

**INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS-GRIGNON**

THESE

Présentée pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

par

Michel NDOUMBE NKENG

Sujet :

**INCIDENCE DES FACTEURS AGRO - ECOLOGIQUES SUR
L'EPIDEMIOLOGIE DE LA POURRITURE BRUNE DES FRUITS
DU CACAOYER AU CAMEROUN :
CONTRIBUTION A LA MISE EN PLACE D'UN MODELE
D'AVERTISSEMENTS AGRICOLES**

Soutenue le 22 octobre 2002 devant le jury composé de :

MM. :	Guy RAYNAL	:	Président
	Jean-Loup NOTTEGHEM	:	Rapporteur
	Jöel CHADOEUF	:	Rapporteur
	Jean-Louis SARAH	:	Examineur
	Ivan SACHE	:	Examineur
	Christian CILAS	:	Examineur

*A Yvonne, ma charmante épouse,
en hommage à ton abnégation et tes encouragements pendant la préparation de cette thèse.*

PREAMBULE

Les travaux de cette thèse ont fait l'objet de deux articles soumis pour publication, l'un dans une revue scientifique, l'autre dans une revue de développement.

Article 1 :

- **Titre** : Impact of removing diseased pods on cocoa black pod caused by Phytophthora megakarya and cocoa production in Cameroon.
- **Auteurs** : M. Ndoumbè-Nkeng*, C. Cilas**, E. Nyemb*, S. Nyassè*, D. Bieysse**, A. Flori**, I. Sache***

(* IRAD, BP 2067 Messa Yaoundé – Cameroon ;** CIRAD, Avenue Agropolis – 34398 Montpellier Cedex 5 – France ; *** INRA, BP 01 – 78850 Thiverval Grignon)

- **Revue** : Crop Protection, Oxford, Royaume-Uni.

Article 2 :

- **Titre** : Lutte contre la pourriture brune des cabosses du cacaoyer au Cameroun : améliorer les connaissances épidémiologiques afin d'intervenir au bon moment
- **Auteurs** : Michel Ndoumbè-Nkeng* et Ivan Sache**

(*Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD), BP 2067 Yaoundé Cameroun ;

**Laboratoire de Pathologie Végétale, INRA BP 01 78850 Thiverval-Grignon France)

- **Revue** : PHYTOMA La Défense des Végétaux, Paris, France.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	vii
LISTE DES PHOTOS	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
 INTRODUCTION GENERALE	 1
 CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	 4
 1.1. La plante hôte : Le cacaoyer	 4
1.1.1. Origine, historique et utilisation	4
1.1.2. Production et commercialisation	8
1.1.3. Classification botanique	9
1.1.4. Morphologie et biologie	11
1.1.5. Agro-écologie	13
1.1.6. Amélioration génétique du cacaoyer	14
1.1.6.1. La collection de cacaoyers au Cameroun	16
1.1.6.2. La multiplication par voie végétative	16
1.1.7. Les ennemis et maladies du cacaoyer	17
 1.2. L'agent pathogène de la pourriture des fruits : <i>Phytophthora megakarya</i> ...	 18
1.2.1. Taxonomie	18
1.2.2. Structure des populations de <i>Phytophthora megakarya</i>	20
1.2.3. La reproduction	20
1.2.2.1. Reproduction sexuée	21
1.2.2.2. Reproduction asexuée	23
 13. La maladie : la pourriture brune des fruits due à <i>Phytophthora spp</i>	 24
1.3.1. Importance socio-économique	24
1.3.2. Etiologie et symptomatologie	24

1.3.3.	Méthodes de lutte	26
1.3.3.1.	Lutte génétique	26
1.3.3.2.	Lutte chimique	28
1.3.3.3.	Lutte culturale	29
1.3.3.4.	Lutte biologique	29
1.4.	Epidémiologie	30
1.4.1.	Epidémiologie des maladies fongiques aériennes – Généralités	30
1.4.1.1.	Relations avec les facteurs environnementaux	30
1.4.1.1.1.	Le rayonnement	31
1.4.1.1.2.	La température	32
1.4.1.1.3.	Le vent	32
1.4.1.1.4.	L'humidité	33
1.4.2.	Dynamique temporelle des épidémies	34
1.4.3.	Dynamique spatio-temporelle	40

**CHAPITRE 2 : RELATIONS ENTRE LA DYNAMIQUE EPIDEMIQUE
DE LA POURRITURE BRUNE DES FRUITS
DU CACAOYER ET LES VARIABLES CLIMATIQUES 41**

2.1.	Introduction	41
2.2.	Matériel et Méthodes	43
2.2.1.	Travaux réalisés en parcelles paysannes	43
2.2.1.1.	Description des sites et dispositif expérimental	43
2.2.1.2.	Variables mesurées	45
2.2.2.	Travaux réalisés en laboratoire	47
2.2.2.1.	Détermination de la durée d'humectation des fruits à différents stades de leur développement	47
2.2.2.2.	Détermination du stade de plus grande sensibilité des fruits à l'attaque de <i>P. megakarya</i> en laboratoire	47
2.2.3.	Analyses statistiques	48
2.2.3.1.	Variables dérivées	48
2.2.3.2.	Graphiques et analyses de variance	49

2.2.3.3.	Calcul des autocorrélations temporelles et des corrélations croisées	50
2.2.3.4.	Analyses en régression multiple	52
2.3.	Résultats	54
2.3.1.	Expériences en parcelles paysannes	54
2.3.1.1.	Analyse de variance des variables climatiques	56
2.3.1.2.	Variables d'état sanitaire et de production	58
2.3.2.	Expériences en laboratoire	60
2.3.3.	Autocorrélations temporelles et corrélations croisées	62
2.3.4.	Régression multiple	66
2.4.	Discussion	68
 CHAPITRE 3 : DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DES EPIDEMIES		
	DUES A <i>Phytophthora megakarya</i>	71
3.1.	Introduction	71
3.2.	Matériel et Méthodes	74
3.2.1.	Description des parcelles expérimentales	74
3.2.2.	Variables mesurées en champ	74
3.2.3.	Analyses statistiques	75
3.2.3.1.	Définition et choix de la taille des voisinages	76
3.2.3.2.	Langage de la géostatistique	77
3.2.3.3.	Autocorrélations spatiales	79
3.3.	Résultats	81
3.3.1.	Dynamique des symptômes de pourriture brune sur le fruit	81
3.3.2.	Dynamique de la maladie à l'échelle de l'arbre	85
3.3.3.	Dynamique de la maladie à l'échelle de la parcelle	87
3.3.3.1.	Dynamique temporelle de la maladie	87
3.3.3.2.	Etude de la distribution spatiale	89
3.3.3.2.1.	Représentations graphiques	89

3.3.3.2.2.	Etude des semi-variogrammes	96
3.3.3.2.3.	Autocorrélations spatiales	100
3.4.	Discussion	100
 CHAPITRE 4 : IMPACT DE LA RECOLTE SANITAIRE SUR LA PRODUCTION ET LE TAUX DE POURRITURE BRUNE DES CABOSSES DU CACAOYER		
		103
4.1.	Introduction	103
4.2.	Matériel et Méthodes	104
4.2.1.	Description des sites et dispositif expérimental	104
4.2.2.	Analyses statistiques	105
4.3.	Résultats	107
4.4.	Discussion	113
 CHAPITRE 5 : DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALES		
		117
5.1.	Récapitulatif des principaux résultats	119
5.1.1.	Relation dynamique de la maladie – facteurs climatiques	119
5.1.2.	Dynamique spatio-temporelle de la maladie	120
5.1.3.	Impact du prélèvement des fruits malades	120
5.2.	Conséquences épidémiologiques	121
5.2.1.	Mécanismes de dispersion de la maladie	122
5.2.2.	Relations quantitatives entre la maladie et les variables climatiques	123
5.2.3.	Progression spatio-temporelle de la maladie	125
5.3.	Conséquences pratiques	126
5.3.1.	Date du premier traitement fongicide	126
5.3.2.	Lieu et nombre de traitements	127

5.3.2. Perspectives	129
---------------------------	-----

BIBLIOGRAPHIE	131
---------------------	-----

ANNEXES

Annexe 1 : Figures d'évolution du taux de pourriture et des températures à Goura et à Barombi-Kang

Annexe 2 : Corrélogrammes des autocorrélations et des corrélations croisées à Goura et à Barombi-Kang

Annexe 3 : Cartes de la répartition spatiale du nombre total de cabosses et de l'incidence de la maladie à Mbankomo et à Goura

Annexe 4 : Semi-variogramme de l'incidence de la maladie à Mbankomo et Goura

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse n'aurait jamais abouti sans l'aide des organismes suivants :

L'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD) ; l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (INA P-G) ; le Centre de Coopération International pour la Recherche Agronomique et le Développement (CIRAD) à Montpellier ; l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) à Grignon ; le Ministère français de la Coopération ; la firme phytosanitaire SYNGENTA.

Dans ces différentes institutions, vous avez été nombreux à m'apporter un très grand appui tant sur le plan scientifique que logistique. Je vous exprime ma sincère gratitude.

Je tiens à remercier tout particulièrement le Professeur G. Raynal, Enseignant Responsable de cette thèse, qui a mis tout en œuvre pour que sa préparation se déroule dans les conditions les meilleures. Je suis fortement reconnaissant envers MM. C. Cilas et I. Sache qui en ont assuré l'encadrement. Je vous ai trouvés merveilleux. J'adresse de vifs remerciements à MM. J.L. Sarah, D. Bieysse et M. Boccara pour le soutien inestimable apporté au cours de ce travail.

Je remercie infiniment mes parents, mes beaux-parents, mes frères, mes sœurs et mes ami(e)s, pour l'affection que vous n'avez jamais cessée de m'accorder.

J'ai une profonde pensée pour ma chère maman, qui a tant donné d'elle-même pour notre éducation et qui nous a malheureusement quittés si tôt. Sita Mami, MERCI pour tout !

Aux familles Mayi, Jouvenel, Nyeck-Ngan et Kaiser en France, je dis sincèrement merci pour l'ambiance familiale dans laquelle vous avez su me replonger.

Mes chers enfants, ce travail m'a assez souvent obligé à ne pas être là ; merci infiniment pour votre compréhension. Croyez moi, vous m'avez beaucoup manqué pendant ces dernières années.

LISTE DES ABREVIATIONS

CATIE	<i>Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Ensenanza</i> (Costa Rica)
CEPEC	<i>Centro de Pesquisas de Cacau</i> (Brésil)
CEPLAC	<i>Comissao Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira</i> (Brésil)
CIRAD	Centre de Coopération International pour la Recherche Agronomique et le Développement
CRU	<i>Coffee Research Unit</i> (Trinidad)
ENSA	Ecole Nationale Supérieure Agronomique
ICCO	<i>International Cocoa Organisation</i>
ICS	<i>Imperial College Selection</i>
INIAP	<i>Instituto Nacional de Investigaciones Agronomicas de Pichilingue</i> (Equateur)
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IRAD	Institut de Recherche Agricole pour le Développement
IRCC	Institut de Recherche Café Cacao
MARDI	<i>Malaysian Agricultural Research and Development Institute</i>
ONCPB	Office National de Commercialisation des Produits de Base
SODECAO	Société de Développement du Cacao
WACRI	<i>West African Coffee Research Institute</i> (Ghana)

LISTE DES PHOTOS

- Photo 1.1 :** Vue d'une cacaoyère en début floraison à Mbankomo (mois de mars)
- Photo 1.2 :** Coupe transversale d'un fruit de cacaoyer, montrant les graines ou fèves, entourées d'une pulpe mucilagineuse
- Photo 1.3 :** Fruits attaqués par *Phytophthora spp* A gauche : *P. palmivora* ; à droite : *P. megakarya*.
- Photo 2.1 :** Cacaoyère en début de production (parcelle expérimentale de Mbankomo)
- Photo 5.1 :** Agriculteur appliquant un traitement chimique dans une parcelle de cacaoyers à Mbankomo

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1.1** : Statistiques de la production mondiale de cacao fèves (x 1000 tonnes)
- Tableau 1.2** : Divers cacaoyers cultivés et leur répartition
- Tableau 1.3** : Recommandations de l'IRAD pour la lutte chimique contre la pourriture brune des cabosses du cacaoyer au Cameroun (Epidémiologie dans la zone agro-écologique forestière à pluviométrie bimodale)
- Tableau 2.1** : Observations faites individuellement sur 180 fruits à Mbankomo
- Tableau 2.2** : Echelle d'évaluation de la sévérité de la maladie sur les fruits
- Tableau 2.3** : Moyennes des variables climatiques mesurées en parcelles paysannes (avril – novembre de chaque année)
- Tableau 2.4** : Moyennes des variables d'état sanitaire et de production en parcelles paysannes par site
- Tableau 2.5** : Résultats de l'analyse de régression entre Taux de pourriture et Pluviométrie.
- Tableau 2.6** : Quantité de pluie nécessaire (mm) pour engendrer un taux de pourriture hebdomadaire de 1 % par année dans les différents sites (Estimations basées sur les équations du tableau 2.5)
- Tableau 3.1** : Position des premiers symptômes de pourriture brune par zone en fonction du stade de développement du fruit
- Tableau 3.2** : Statistiques du test *I* de Moran (1999 – 2001)
- Tableau 4.1** : Incidence de la maladie (taux final de pourriture) mesurée dans les parcelles expérimentales de Ngoulessaman et Elalè
- Tableau 4.2** : Variables climatiques mesurées dans les sites expérimentaux de Ngoulessaman et Elalè en 1999
- Tableau 4.3** : Ajustement de trois modèles aux données expérimentales : Modèle Linéaire Général, GLM ; Modèle Linéaire Généralisé, GENMOD ; Modèle Linéaire Généralisé Mixte, GLIMMIX
- Tableau 4.4** : Tests des effets fixes sur trois variables (*TPH* : Taux de pourriture hebdomadaire ; *MS* : Mûr-sain et *PP* : Production potentielle) à Elalè
- Tableau 4.5** : Tests des effets fixes sur trois variables (*TPH* : Taux de pourriture hebdomadaire ; *MS* : Mûr-sain et *PP* : Production potentielle) à Ngoulessaman
- Tableau 4.6** : Nombre moyen de fruits par arbre dans les états sanitaires. (*PP*, Production Potentielle)

LISTE DES FIGURES

- Figure 1** : Distribution mondiale du cacaoyer (Wood, 1991)
- Figure 1.1** : Cycle biologique de *Phytophthora*, d'après Shaw (1988) et Brasier (1992)
- Figure 1.2** : Introduction de la durée de latence (p) et de la durée de vie des tissus contagieux (i) dans la prise en compte des temps à considérer pour connaître la vitesse contagieuse de progression d'une épidémie à intérêt composé
- Figures 2** : Carte du Cameroun représentant les différentes zones agro-écologiques et les sites d'observations de l'étude
- Figure 2.1** : Evolution du taux de pourriture hebdomadaire et de la pluviométrie à Mbankomo
- Figure 2.2** : Evolution des températures moyennes ambiantes et sous-cacaoyères et du nombre de jours de pluie par semaine à Mbankomo
- Figure 2.3** : Evolution du taux de pourriture hebdomadaire et de la pluviométrie à Goura (**annexe 1**)
- Figure 2.4** : Evolution des températures moyennes ambiantes et sous-cacaoyères et du nombre de jours de pluie par semaine à Goura (**annexe 1**)
- Figure 2.5** : Evolution du taux de pourriture hebdomadaire et de la pluviométrie à Barombi-Kang (**annexe 1**)
- Figure 2.6** : Evolution des températures moyennes ambiantes et sous-cacaoyères et du nombre de jours de pluie par semaine à Barombi-Kang (**annexe 1**)
- Figure 2.7** : Evolution du cycle de fructification en parcelle paysanne (Mbankomo)
- Figure 2.8** : Durée d'humectation des fruits
- Figure 2.9** : Echelle de sensibilité des fruits
- Figure 2.10** : Corrélogrammes de la pluviométrie à Mbankomo (1999 – 2001)
- Figure 2.11** : Corrélogrammes de la pluviométrie à Goura (1999 – 2001) (**annexe 2**)
- Figure 2.12** : Corrélogrammes de la pluviométrie à Barombi-Kang (1999 – 2001) (**annexe 2**)
- Figure 2.13** : Corrélogrammes du taux de pourriture à Mbankomo (1999 – 2001)
- Figure 2.14** : Corrélogrammes du taux de pourriture à Goura (1999 – 2001) (**annexe 2**)
- Figure 2.15** : Corrélogrammes du taux de pourriture à Barombi-Kang (1999 – 2001) (**annexe 2**)
- Figure 2.16** : Corrélations croisées Taux de pourriture - Pluviométrie à Mbankomo
- Figure 2.17** : Corrélations croisées Taux de pourriture - Pluviométrie à Goura (**annexe 2**)

Figure 2.18 : Corrélations croisées Taux de pourriture - Pluviométrie à Barombi-Kang (annexe 2)

Figure 3 : Disposition des arbres dans les parcelles expérimentales des différents sites

Figure 3.1 : Allure générale d'un semi-variogramme

Figure 3.2 : Répartition des fruits par niveau de l'arbre à Mbankomo (graphique de gauche : total de cabosses ; graphique de droite : cabosses pourries)

Figure 3.3 : Répartition des fruits par niveau de l'arbre à Goura (graphique de gauche : total de cabosses ; graphique de droite : cabosses pourries)

Figure 3.4 : Répartition des fruits par niveau de l'arbre à Barombi-Kang (graphique de gauche : total de cabosses ; graphique de droite : cabosses pourries)

Figure 3.5 : Evolution de l'incidence de la maladie par année

Figure 3.6 : Nombre cumulé d'arbres portant des fruits atteints de pourriture brune

Figure 3.7 : Répartition du nombre total de cabosses par arbre à Mbankomo en 2000 (Annexe 3)

Figure 3.8 : Répartition du nombre total de cabosses par arbre à Goura en 2000 (Annexe 3)

Figure 3.9 : Répartition du nombre total de cabosses par arbre à Barombi-Kang en 2000.

Figure 3.10 : Répartition de l'incidence de la maladie (en %) par arbre à Mbankomo en 1999 (Annexe 3)

Figure 3.11 : Répartition de l'incidence de la maladie (en %) par arbre à Goura en 1999 (Annexe 3)

Figure 3.12 : Répartition de l'incidence de la maladie par arbre à Barombi-Kang en 1999

Figure 3.13 : Répartition de l'incidence de la maladie (en %) par arbre à Mbankomo en 2000 (Annexe 3)

Figure 3.14 : Répartition de l'incidence de la maladie par arbre à Goura en 2000 (Annexe 3)

Figure 3.15 : Répartition de l'incidence de la maladie par arbre à Barombi-Kang en 2000

Figure 3.16 : Répartition de l'incidence de la maladie par arbre à Mbankomo en 2001

Figure 3.17 : Répartition de l'incidence de la maladie par arbre à Barombi-Kang en 2001

Figure 3.18 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année en 1999 à Mbankomo (Annexe 4)

Figure 3.19 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année en 1999 à Goura (Annexe 4)

Figure 3.20 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année en 1999 à Barombi-Kang

Figure 3.21 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année en 2000 à Mbankomo (**Annexe 4**)

Figure 3.22 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année en 2000 à Goura (**Annexe 4**)

Figure 3.23 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année en 2000 à Barombi-Kang

Figure 3.24 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année en 2001 à Mbankomo (**Annexe 4**)

Figure 3.25 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année en 2001 à Barombi-Kang

Figure 4.1 : Courbes cumulées de l'incidence de la pourriture brune à Elalè et Ngoulessaman dans les parcelles « avec » et « sans » prélèvement des fruits malades

INTRODUCTION GENERALE

Au Mexique, les Mayas puis les Aztèques, ont été les premiers à cultiver rationnellement le cacaoyer (Braudeau, 1969). Cette plante avait de multiples usages : ses fèves étaient envoyées à la cour comme tribut ; elles servaient de monnaie d'échange. Elles servaient aussi de base à la préparation d'une boisson reconstituante, fortifiante et prétendue aphrodisiaque à partir des fèves, grillées puis concassées sur des pierres plates. En 1519, les Conquistadors qui débarquent sur la côte du Tabasco au Mexique, ont l'idée d'ajouter à cette boisson du sucre de canne et un peu de vanille. Ils viennent d'inventer le chocolat (Nikita, 1992). L'engouement pour le cacao va progressivement se développer et les Espagnols encouragent sa culture dans les Caraïbes et en Amérique latine. Les Anglais, les Français, les Hollandais et les Portugais l'implantent également dans leurs colonies respectives. C'est ainsi que le cacaoyer a été introduit en Afrique en 1822 à Sao Tomé, puis au Ghana en 1857. Le continent africain est devenu aujourd'hui le premier producteur de cacao, avec près de 66 % de la production mondiale. Le Cameroun est, après la Côte d'Ivoire, le Ghana et le Nigeria, le quatrième pays producteur en Afrique (ED et F Man, 2002).

Dans une cacaoyère, les densités moyennes généralement pratiquées sont de l'ordre de 1200 plants par hectare. Chaque arbre porte en moyenne 25 fruits, quantité nécessaire pour produire un kilogramme de cacao marchand. En conséquence, le rendement théorique est de l'ordre de 1200 kilogrammes de cacao par hectare. Or au Cameroun, ces rendements ne sont que de l'ordre de 300 à 400 kg. Parmi les causes évoquées pour expliquer ces faibles rendements, on peut citer le vieillissement des plantations, des pratiques culturales inadéquates, les dégâts des insectes et, surtout, les maladies cryptogamiques parmi lesquelles la pourriture brune des cabosses.

La pourriture brune provoque des pertes de production importantes, estimées à près de 30 % à l'échelle mondiale (Lass, 1985). Les fèves issues de cabosses atteintes de pourriture brune sont impropres à la consommation et le plus souvent détruites. Des pertes de 50 % de la production sont couramment observées chaque année au Cameroun. Dans les zones où les conditions écologiques sont très favorables au développement de la maladie, les pertes peuvent atteindre 80 % de la récolte (Despréaux *et al.*, 1988). La maladie est due à un agent pathogène appartenant au genre *Phytophthora*. Au Cameroun, des études ont mis en évidence la

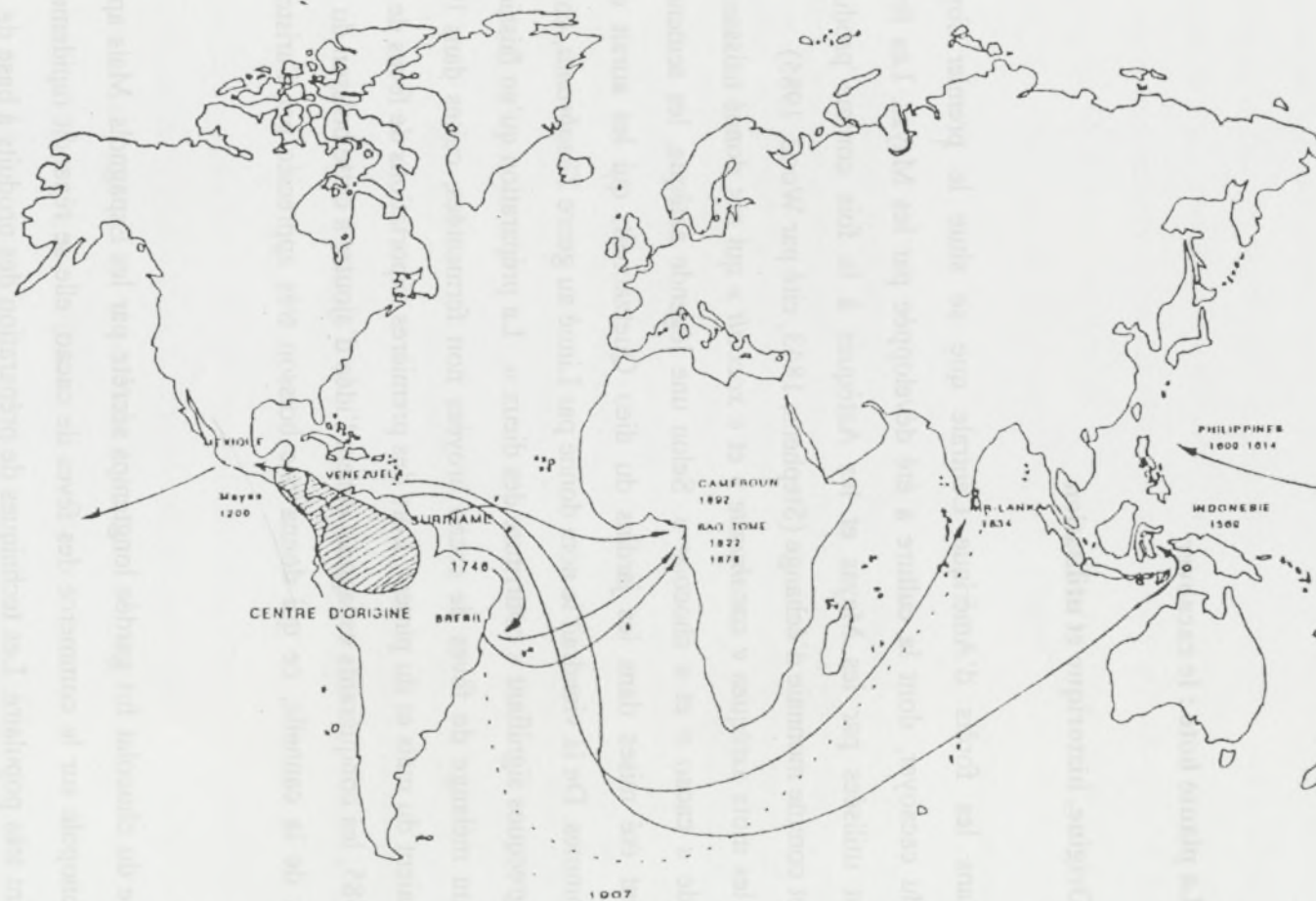


Figure 1 : Distribution mondiale du cacaoyer (Wood, 1991)

Du fait de l'engouement des pays européens pour le chocolat, la culture du cacaoyer se développa dans d'autres régions du monde, tout d'abord dans les Antilles notamment à Trinidad et en Jamaïque. Rapidement, les différentes puissances colonisatrices répandirent sa culture dans leurs colonies respectives (cf. figure 1). C'est ainsi que les Espagnols l'introduisirent pour la première fois en Asie, aux Philippines vers 1600 ; les Portugais la développèrent au Brésil à partir de 1740. L'introduction du cacaoyer en Afrique est plus récente. C'est à partir des îles Fernando Poo (aujourd'hui Malabo), Sao Tomé et Príncipe que le cacaoyer a été introduit en Afrique en 1822. Les missionnaires suisses le transportèrent ensuite au Ghana en 1857, tandis que les Allemands l'introduisirent au Cameroun en 1892 à partir des îles de Sao Tomé et Príncipe (Nya Ngatchou, 1981 ; Wood, 1991).

Ce sont des cacaoyers de type Forestero qui furent d'abord largement répandus en Afrique de l'Ouest à partir du Ghana, puis ce furent quelques Trinitario ainsi que des Criollo en 1920 (Toxopeus, 1972) qui s'hybridèrent avec les Amelonado locaux (cf. § 1.1.3.).

A maturité, les fruits sont récoltés, puis la coque est fendue et les fèves extraites sont mises à fermenter en tas recouverts de feuilles de bananier ou en caisse, pendant 5 à 7 jours selon les génotypes et les conditions de fermentation. La fermentation est nécessaire à l'élaboration des précurseurs de l'arôme du chocolat. Les fèves fermentées sont mises à sécher à l'air libre ou en séchoirs artificiels : les graines sèches constituent alors le cacao marchand qui sera stocké et échangé. De ce cacao dérivent alors divers produits utilisés en chocolaterie.

Les produits dits semi-finis sont la pâte de cacao et ses dérivés directs, poudre et beurre de cacao. La pâte de cacao est obtenue après torréfaction (chauffage des fèves à une température de 100 à 150 °C pendant 20 à 40 minutes, dans le but d'abaisser la teneur en eau jusqu'à 1,5 - 2 %, de provoquer l'évaporation des acides volatils, de faciliter la séparation de l'amande et des coques et surtout de développer l'arôme du chocolat), concassage (les fèves refroidies sont transportées dans un concasseur où les coques brisées sont séparées des amandes par ventilation), mélange et broyage (les graines sont écrasées finement à une température de 50-70 °C). Cette pâte peut être maintenue fluide à la chaleur ou moulée et refroidie pour être stockée ; elle porte alors le nom de « masse de cacao ». Elle servira à la fabrication du beurre, de la poudre ou du chocolat.

Les produits finis sont les chocolats. Il s'agit du chocolat en poudre (préparé directement à partir de la poudre de cacao à laquelle on ajoute du sucre et de la vanille), du cacao solubilisé (poudre de cacao à laquelle sont ajoutés certains ingrédients pour la rendre

Tableau 1.1 : Statistiques de la production mondiale de cacao fèves (x 1000 tonnes)

Pays	Année							
	1993/94	1994/95	1995/96	1996/97	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01
AFRIQUE								
Côte d'Ivoire	887	862	1 265	1 130	1 090	1 176	1 404	1 185
Ghana	255	310	404	323	409	398	435	395
Nigeria	145	145	165	160	165	200	175	190
Cameroun	97	109	117	121	114	123	114	125
Togo	4	4	5	9	6	7	7	7
Guinée								
Equatoriale	4	3	5	4	5	4	5	4
Sao Tomé et								
Principe	4	2	3	3	4	5	3	4
Libéria	0	0	0	1	2	2	3	3
Autres	18	17	18	22	23	19	18	18
Total								
AFRIQUE	1 414	1 452	1 982	1 773	1 818	1 934	2 164	1 933
AMERIQUE								
Brésil	276	215	222	183	173	138	124	163
Equateur	79	83	103	101	28	72	92	81
République								
Dominicaine	59	57	55	47	60	24	30	36
Colombie	49	48	45	39	38	39	37	40
Mexique	39	43	30	35	30	25	30	31
Venezuela	18	16	15	15	14	15	16	14
Pérou	11	13	15	18	17	13	12	13
Costa Rica	3	3	4	5	4	5	4	4
Haiti	3	5	3	4	3	2	3	3
Bolivie	3	3	3	3	3	3	3	3
Autres	13	13	10	11	10	11	10	11
Total								
AMERIQUE	553	499	505	461	380	347	361	399
ASIE-PACIFIQUE								
Indonésie	251	238	284	327	331	393	412	388
Malaisie	204	120	116	102	57	79	41	45
Papouasie								
Nouvelle	31	29	35	28	26	35	46	43
Guinée								
Philippines	7	4	5	8	10	8	8	8
Inde	6	5	6	6	6	6	6	7
Iles Salomon	3	3	4	4	4	3	3	2
Autres	3	3	4	3	3	3	3	3
Total ASIE-PACIFIQUE	505	402	454	478	437	527	519	496
TOTAL MONDIAL								
MONDIAL	2 472	2 353	2 941	2 712	2 635	2 808	3 044	2 828
TENDANCES REGIONALES								
AFRIQUE	57.2%	61.7%	67.4%	65.4%	69.0%	68.9%	71.1%	68.4%
AMERIQUE	22.4%	21.2%	17.2%	17.0%	14.4%	12.4%	11.9%	14.1%
ASIE	20.4%	17.1%	15.4%	17.6%	16.6%	18.8%	17.0%	17.5%

Source : ED&F Man Cocoa Ltd (Rapport Février 2002)

soluble dans l'eau ou dans le lait), les « petits déjeuners » (caractérisés par la présence de farines précuites ajoutées en plus ou moins grande quantité à la poudre de cacao et au sucre) et le chocolat proprement dit (mélange de pâte de cacao et de sucre qui peut être additionné de beurre de cacao, de lait, de fruits ou d'aromates) (Mossu, 1990).

1.1.2. Production et commercialisation

La production mondiale a connu une croissance impressionnante. En 1900, elle était d'environ 125.000 tonnes de cacao marchand venant presque totalement d'Amérique Centrale et du Sud (Braudeau, 1969). La production africaine n'était que de 20.000 tonnes, soit 16 % de la production mondiale. Le milieu du 20^{ème} siècle a vu s'amplifier considérablement la production, qui a atteint 1,5 million de tonnes en 1964 (Mossu, 1990). Cette production a pratiquement doublé à la fin du siècle, passant à 2,8 millions de tonnes, dont la répartition est d'environ 66 % pour l'Afrique, 20 % pour l'Amérique et 14 % pour l'Asie (tableau 1.1).

Les principaux pays importateurs de fèves de cacao sont les Etats-Unis (426.000 tonnes), les Pays Bas (32.000 tonnes), l'Allemagne (308.000 tonnes), le Royaume-Uni (193.000 tonnes), et la France (108.000 tonnes). Les principaux pays consommateurs de chocolat (> 10 kg / habitant / an), sont la Suisse, l'Allemagne, la Russie, et la France (ICCO, 1999).

Pendant longtemps, la consommation équivalait à peu près à la production mais de temps à autre, la demande a dépassé l'offre, conduisant à des flambées de prix. Cette situation a provoqué la création de nouvelles plantations à travers les zones de production. A partir de 1985, une offre très supérieure à la demande a provoqué une chute des cours du cacao. La croissance de la production dans les pays comme la Côte d'Ivoire et l'entrée dans la production des pays d'Asie (Indonésie et Malaisie) sont responsables de cette situation. Mais, comme le décrit Ruf (1995), le marché du cacao est cyclique et les crises sont amenées à se résorber.

Au Cameroun, avant la libéralisation de la filière cacao, les prix au producteur, identiques dans l'ensemble des bassins de production, étaient fixés par décret présidentiel. Les sociétés coopératives étaient les intermédiaires entre les planteurs et les exportateurs. Leur rémunération était fixée par contrat de commercialisation avec les exportateurs dans leurs zones respectives. Les exportateurs assuraient l'achat, le transport, le stockage et le

préfinancement des exportations. L'ONCPB leur remboursait tous les frais avec un certain bénéfice, 3,5 F CFA / kg par exemple en 1984 (Despréaux, communication personnelle). Depuis les années 90, la libéralisation de la filière s'est faite sans mesures d'accompagnement. Les producteurs ont vu leurs revenus nets décroître. Ils ont alors adopté une attitude d'expectative par l'exploitation à moindres frais de leurs plantations, dans un contexte d'accès limité au crédit et aux intrants.

1.1.3. Classification botanique

La première description botanique de l'arbre est donnée par Hernandez en 1630. En 1737, Linné retint le mot *Theobroma* comme nom de genre. C'est dans l'espèce *Theobroma cacao* L., tribu des Byttneriées, ordre des Tiliales et famille des Sterculiacées que se classent aujourd'hui toutes les espèces cultivées.

On distingue trois grands groupes d'origines géographiques différentes comme l'indique le tableau 1.2.

La taille, la forme et la couleur du fruit sont fonction des cultivars :

- Les *Criollo* sont caractérisés par des fruits longs et pointus. Leurs cabosses sont de couleur verte ou violette avant maturité, et jaune-orange ou rouge à maturité. La graine est tendre. Ils sont très sensibles aux maladies, notamment la pourriture brune des fruits, et sont peu cultivés.
- Les *Forestero* (Bas et Hauts Amazoniens) ont des cabosses vertes devenant jaunes à maturité, de forme ovale, sans sillon profond et à coques épaisses et dures. La graine est violet foncé et plate. L'*Amelonado* africain est rattaché à ce groupe qui fournit la grande majorité des cacaoyers courants. Les *Forestero* sont des cacaoyers vigoureux, présentant parfois un bon niveau de tolérance et de résistance aux maladies. Ils fournissent un cacao de qualité moyenne et donnent 80 % de la production mondiale.
- Les *Trinitario* sont des hybrides des deux groupes précédents. La première hybridation entre ces deux groupes s'est réalisée naturellement à Trinidad. Ils représentent 10 à 15 % de la production mondiale de cacao.



Photo 1.1 : Vue d'une cacaoyère en début de floraison à Mbankomo (mois de mars)

1.1.4. Morphologie et biologie

Le cacaoyer est une plante pérenne qui se rencontre à l'état naturel dans les étages inférieurs des forêts tropicales humides d'Amérique, où il peut atteindre 12 à 15 mètres. En plantation, la jeune plante émet un axe orthotrope qui croît de manière continue, jusqu'à 18-24 mois, puis différencie une couronne de 3 à 5 branches plagiotropes. Plus tard, sous la couronne et à la base de la tige principale, partent d'autres axes orthotropes encore appelés 'gourmands', qui sont éliminés au fur et à mesure de leur apparition. Le développement végétatif de la plante dépend beaucoup de l'espace disponible. Le cacaoyer cultivé atteint son plein développement vers l'âge de 10 ans (Braudeau, 1969). La plante adulte n'atteint que 5 à 7 mètres de hauteur (photo 1.1).

Le cacaoyer est une plante diploïde dont le nombre chromosomique est de $2n = 20$. Il est essentiellement allogame. Cependant certaines variétés comme les *Amelonado* sont autogames. Le système d'autoincompatibilité se traduit par la chute des fleurs pollinisées avec du pollen incompatible (Knight et Rogers, 1955 ; Cope, 1962).

Les inflorescences se développent sur le tronc et les branches (cauliflorie) au niveau de massifs appelés « coussinets floraux ». Les périodes de floraison sont variables d'une année à l'autre, et dépendent aussi des conditions climatiques. Les *Amelonado* Ouest Africains ont deux pics de floraison dans l'année, alors que les *Forestero* Haut Amazoniens et leurs hybrides fleurissent tout au long de l'année. Les fleurs sont hermaphrodites et possèdent un ovaire qui contient 30 à 60 ovules. Un coussinet peut porter de très nombreuses fleurs en même temps et un cacaoyer peut produire plusieurs dizaines de milliers de fleurs dans l'année ; mais seulement quelques dizaines de fleurs sont fécondées. Ceci s'explique par le fait que, la pollinisation, essentiellement entomophile, est insuffisante (Reffye *et al.*, 1978) ; peu de fleurs pollinisées peuvent assurer le premier stade de développement des fruits, la nouaison. Le faible taux de nouaison est expliqué par Lachenaud (1991) plutôt par des problèmes nutritionnels, puisque même suffisamment pollinisées, les fleurs peuvent chuter. Pour augmenter le nombre de nouaisons et de fruits produits dans les champs semenciers, certains pays ont recours à des pollinisations manuelles.



Photo 1.2 : Coupe transversale d'un fruit de cacaoyer, montrant les graines ou fèves, entourées d'une pulpe mucilagineuse (source : Nyassé, 1997)

Tableau 1.2 : Divers cacaoyers cultivés et leur répartition

Groupes	Cultivés
Criollo	<ul style="list-style-type: none"> - Criollo mexicains - Criollo 'Nicaragua' - Pentagona (surtout Mexique) - Porcelana (Vénézuëla)
Forestero	Bas-Amazoniens : <ul style="list-style-type: none"> • Comum Para, Catongo • Maranhao (Brésil) • Nacional (Equateur) • Matina (Costa Rica) • 'Amelonado' (Afrique Occidentale) Hauts-Amazoniens Introduits au 20 ^{ème} siècle dans les schémas d'amélioration
Trinitario	<ul style="list-style-type: none"> - Trinitario américains (Trinidad, Vénézuëla, Equateur) - Trinitario africains (surtout Cameroun)

Source : Lachenaud (1991)

Le fruit est une baie indéhiscente et volumineuse appelée chérelle quand il est jeune (jusqu'à 2 mois d'âge environ), et cabosse ensuite. Un flétrissement des jeunes fruits peut survenir suite à un phénomène physiologique (Lachenaud, 1991).

Le fruit est composé d'une coque (péricarpe ou cortex) qui comprend trois parties, l'endocarpe, le mésocarpe et l'épicarpe (photo 1.2). La cavité intérieure du fruit peut contenir jusqu'à 60 graines (encore appelées fèves), entourées d'une pulpe mucilagineuse et portées par un rachis central. Après 150 à 200 jours de développement, les fruits arrivent à maturité. La durée de maturation des fruits dépend des conditions climatiques et des clones : les clones ayant de grosses cabosses comme certains Trinitario (ICS) ont en moyenne 210 jours de développement, alors que les Forestero Haut Amazoniens avec leurs petites cabosses ont 165 jours de maturation (Cilas, 1991).

1.1.5. Agro-écologie

Le cacaoyer se rencontre dans la zone comprise entre les latitudes 15° Sud et 20° Nord (Soria, 1970). Pour un développement optimal, les températures favorables à la croissance de la plante se situent entre 24 et 28 °C. Un minimum de précipitations annuelles de 1500 mm (1100 à 1200 mm dans les sols riches et profonds) est exigé. Il importe que la répartition des pluies soit uniforme, et il est nécessaire que la saison sèche ne dépasse pas trois mois.

La plante issue d'une graine émet une racine pivotante de longueur variable selon le type de sol, tandis que celle issue d'une bouture a un système racinaire fasciculé qui ne lui permet pas de lutter efficacement contre la sécheresse. Les jeunes plantations peuvent être mises en place par semis direct, mais de meilleurs résultats (sur les aspects précocité et mortalité) sont obtenus en repiquant des plants âgés d'environ six mois produits en pépinière. Les densités de plantation pratiquées vont de 400 arbres par hectare au Sri Lanka à 2500 arbres par hectare en Afrique de l'Ouest. La densité moyenne recommandée en Afrique est de 1200 pieds par hectare. Du jeune âge à la fermeture des frondaisons, le cacaoyer a besoin d'ombrage temporaire ; des bananiers ou des cocotiers sont utilisés selon les pays. La culture sans ombrage est souvent préconisée pour l'obtention de bons rendements, mais cette pratique peut être préjudiciable quand il y a un manque d'entretien phytosanitaire (N'goran, 1994).

Au Cameroun, le développement de la cacaoculture s'est fait, dans la majorité des cas, au détriment des forêts. Quand les producteurs constataient une diminution significative de rendements, ils défrichaient les forêts pour la création de nouvelles parcelles. Du fait de la saturation foncière, cette agriculture, dite de fronts pionniers, touche à sa fin. La tendance est de procéder à des replantations avec du matériel végétal plus productif et plus résistant à la pourriture brune des fruits, plutôt que d'envisager de nouveaux défrichements (Mariau, 1999). Le verger camerounais s'étend sur une superficie totale d'environ 400 000 hectares. Les petits exploitants restent les principaux producteurs de cacao, avec des superficies variant de deux à quatre hectares. Les plantations sont réalisées pour la plupart sous un ombrage forestier, qui intercepte environ 70 % de la lumière. Avant leur installation, les plants sont élevés pendant six mois sur substrat en sacs plastiques perméables, sous des pépinières ombragées avec des palmes. La trouaison (creusage des trous de 15 - 20 cm de diamètre et 20 - 30 cm de profondeur, où les jeunes plants seront mis) et la mise en place sont réalisées en début de saison des pluies. Les arbres en plantations sont rarement alignés et l'écartement entre les pieds varie de 2,5 x 2,5 m à 3 x 3 m. Le nombre de pieds à l'hectare est maintenu par un repeuplement annuel dans les vides laissés par les arbres morts. D'autres arbres, surtout fruitiers, tels que les manguiers, les avocatiers, les orangers les safoutiers ou les kolatiers se retrouvent assez souvent éparpillés dans les cacaoyères.

Le cacaoyer commence à produire des fruits dès l'âge de 3 à 4 ans et atteint de bons rendements vers 6 à 7 ans. Les rendements en parcelles paysannes sont compris entre 200 et 800 kilogrammes de cacao marchand à l'hectare, mais il est possible d'atteindre deux tonnes en plantation industrielle et trois tonnes en station de recherche (Falque, 1994). La durée de vie économique optimale pour une plantation est d'environ 30 ans, bien que l'arbre puisse vivre beaucoup plus longtemps.

1.1.6. Amélioration génétique du cacaoyer

Les principaux pays producteurs ont créé des structures de recherche avec un programme d'amélioration variétale. Le plus ancien est le CRU à Trinidad, créé en 1930, dont les travaux ont une très grande envergure. D'autres Centres ont été créés ultérieurement comme l'INIAP en Equateur dans les années 1940, le WACRI au Ghana en 1940, le CATIE au

Costa Rica vers 1950, l' IRCC en 1959 en Côte d'Ivoire, au Cameroun et au Togo, le CEPEC/CEPLAC au Brésil en 1963, et le MARDI en Malaisie en 1965.

Deux voies d'amélioration génétique ont été suivies dans le monde, la sélection clonale et la sélection de descendances hybrides de clones. D'une manière générale, la sélection repose sur des critères de vigueur, de précocité, de productivité, de grosseur des cabosses et de comportement vis-à-vis des maladies et attaques d'insectes (Mossu, 1990). Cependant, les critères en relation avec la qualité du produit intéressent de plus en plus les sélectionneurs. En particulier, la taille des fèves est un caractère fortement héritable (Cilas *et al.*, 1989), et peut donc être considérablement améliorée par sélection.

La sélection s'effectue suivant différentes étapes fondamentales qui sont l'établissement d'une collection, la sélection des clones au sein de cette collection, l'hybridation et l'évaluation des descendances interclonales, enfin la diffusion des meilleures de ces descendances. Il est difficile de tirer un bilan général sur les progrès des différents programmes génétiques. Seule la synthèse des travaux réalisés au Cameroun sera présentée ici.

En 1957, le programme fut axé sur la sélection clonale à partir de génotypes locaux repérés dans les plantations de Trinitarios et Hauts Amazoniens introduits du Ghana. Après un test au champ sur les performances de production, les meilleurs clones ont été testés pour leur aptitude au bouturage. Ainsi une trentaine de clones furent sélectionnés puis multipliés industriellement en parcs à bois, et distribués sous forme de boutures plagiotropes racinées aux planteurs. Le résultat fut un échec, en raison de la forte mortalité au champ et de la sensibilité de ces clones à la pourriture brune et aux insectes (punaises). La sélection clonale fut donc abandonnée au profit de la sélection d'hybrides de clones dès 1960. Les premières semences furent produites en autofécondant des Trinitarios. Leurs performances furent mauvaises en raison d'un effet d'inbreeding marqué (Paulin, 1990). En raison des pertes très importantes dues à la pourriture brune, le programme a été orienté vers la sélection de matériel résistant. Une échelle de sensibilité a été établie sur les clones de la collection par une méthode d'inoculation artificielle du champignon, et la réalisation du premier plan de croisement de type diallèle complet a permis d'étudier les paramètres génétiques intervenant dans la transmission de la résistance.

Des données issues de ce plan de croisement diallèle, une sélection combinée individus-familles a été faite (Ndoumbè *et al.*, 2001). Les deux critères de sélection retenus ont été la production réelle (mesurée par le nombre de cabosses mûres saines produites par arbre durant sept années) et la résistance à la pourriture des cabosses due à *Phytophthora megakarya*

(évaluée par le taux de cabosses pourries). Il s'est agi d'une sélection sur index combinant les deux caractères cibles précédemment cités, et un caractère prédicteur, la production potentielle, qui a amélioré la précision de la prédiction. Après une estimation des paramètres génétiques des caractères considérés, un index de sélection a été construit pour réaliser un bon compromis entre les gains génétiques espérés sur chacun des caractères cibles pris en compte.

1.1.6.1. La collection de cacaoyers au Cameroun

Les cultivars de type Trinitario constituent encore la majeure partie des cacaoyers mis en place au Cameroun. Il s'agit d'une population hybride extrêmement polymorphe. La collection nationale est constituée actuellement d'environ :

- 120 SNK « Sélection de Nkoemvone » (Trinitario et Amelonado locaux)
- 6 UPA « Upper Amazon » (descendance de Forestero Haut Amazonien en provenance du Ghana (WACRI: *West African Cocoa Research Institute*))
- 13 IMC « Iquitos Mixed Callabacillo » (Haut Amazonien collecté à Iquitos au Pérou)
- 15 ICS « Imperial College Selection » Trinitario de Trinidad.

Il y a également eu introduction de cinq pieds de Catongo (Forestero du Brésil) issus d'une même cabosse. Par ailleurs, d'autres espèces du genre *Theobroma* (*T. bicolor* et *T. grandifolia*) ont été introduites au Cameroun en 1983.

1.1.6.2. La multiplication par voie végétative

Le cacaoyer a en général une bonne aptitude à la propagation végétative par bouturage horticole ou par greffage. Le bouturage de rameaux plagiotropes est une technique utilisée essentiellement pour l'implantation des parcelles de collection et des parcelles clonales des stations de recherche. La greffe, qui exige une main d'œuvre habile et rapide, est de plus en plus utilisée (Mossu, 1990). Mais ces deux moyens de multiplication présentent plusieurs inconvénients, notamment au niveau architectural. Au Cameroun par exemple, trente-cinq clones ont été retenus pour leur productivité, leur aptitude au bouturage, leur résistance à la pourriture brune. Ils ont été multipliés par bouturage d'axes plagiotropes, puis vulgarisés. Mais

les jeunes arbres présentaient une forte mortalité à cause de la difficulté d'enracinement des boutures plagiotropes (Paulin et Eskes, 1995). Le développement d'une méthode de multiplication plus fiable et plus rapide telle que l'embryogenèse somatique constitue un espoir pour l'amélioration génétique du cacaoyer. Le principal intérêt réside dans l'intégration de cette méthode dans les programmes de création variétale pour la multiplication conforme des individus hybrides remarquables, ceci permettant de gagner du temps par rapport aux schémas classiques. Mais en dépit des grands progrès effectués dans ce domaine ces dernières années, les résultats de recherche ne sont toujours pas très satisfaisants. Au stade actuel, l'embryogenèse somatique n'est pas encore parfaitement au point pour une production commerciale, mais la technique peut être utilisée, entre autres, pour la conservation des ressources génétiques via la cryoconservation des embryons somatiques ou bien pour l'édification de parcs à bois (Alemanno *et al.*, 1997 ; Li *et al.*, 1998 ; Maximova *et al.*, 2002).

1.1.7. Les ennemis et maladies du cacaoyer

Dans les cacaoyères, des ennemis naturels provoquent de nombreux dégâts. Les principaux insectes ravageurs sont des punaises des genres *Distantiella*, *Sahlbergella*, *Helopeltis* et *Menalonion*, dont les larves piquent les branches, ceci pouvant entraîner la mort de l'arbre. En jeune plantation, les psylles, les thrips, les chenilles défoliatrices et autres insectes détruisent le bourgeon terminal et retardent ainsi la croissance de la plante. En Asie du Sud-Est, les pertes de récolte dues au *cocoa pod borer* (*Conopomorpha cramerella*) peuvent être très importantes.

Les maladies généralement rencontrées chez le cacaoyer sont causées par un champignon ou par un virus. Elles peuvent directement affecter les fruits, le feuillage ou même l'arbre entier entraînant sa mort. Nous n'en citons ici que quelques unes.

La plus importante maladie virale est le *Swollen Shoot*, qui se caractérise par une chute de production sensible et une morphogenèse anormale, se manifestant en particulier par l'apparition de gonflements du bois des rameaux, des rejets ou des racines. Cette maladie sévit surtout en Afrique de l'Ouest, notamment au Ghana et au Togo. Elle est causée par un virus dénommé *Cocoa Swollen Shoot Virus* (CSSV).

La principale maladie cryptogamique présente en Afrique est la pourriture brune des fruits, causée par *Phytophthora spp.* Les fruits atteints présentent une ou plusieurs taches brunes dures au toucher, recouvertes d'un revêtement sporifère blanc-crème. Cette maladie peut également se manifester sur les feuilles et dans le bois des rameaux du tronc ou des racines, où elle provoque l'apparition des chancres. Elle ne doit pas être confondue à la pourriture noire, due à *Botryodiplodia theobromae*, qui se caractérise par des cabosses d'abord tachées de lésions brunes molles au toucher puis qui deviennent ensuite complètement noires comme si elles étaient couvertes d'une sorte de suie. En Amérique, la maladie dite des « balais de sorcière », provoquée par le champignon *Crinipellis perniciosus* entraîne la mort des jeunes plants, des déformations graves des rameaux et de fortes pertes de production, tout comme la moniliose, due à *Moniliophthora roreri*, qui atteint les fruits à l'intérieur desquels les fèves sont amalgamées en masse brune plus ou moins liquéfiées. Il y a également le Vascular Streak Dieback (VSD), due à *Oncobasidium theobromae*, qui provoque la chute des feuilles et la mort des rameaux (la maladie gagne lentement toutes les branches et finit par tuer le cacaoyer, quel que soit son âge) et le « mal de machette » (ou mort subite), causée par *Ceratocystis fimbriata*, qui se caractérise par le dessèchement brutal d'une portion ou de toute la frondaison, suivie de la nécrose et la mort rapide des zones infectées.

Alors que les maladies telles que la moniliose, le « balai de sorcière » ou le VSD sont localisées à certaines zones géographiques, la pourriture brune des fruits se trouve dans presque toutes les aires de culture, provoquant des dégâts plus ou moins importants en fonction des localités, d'où l'importance relative accordée à *Phytophthora spp* par rapport aux autres agents pathogènes.

1.2. L'agent pathogène de la pourriture brune des fruits : *Phytophthora spp*

1.2.1. Taxonomie

Jusqu'à un passé récent, les parasites du genre *Phytophthora* étaient considérés taxonomiquement comme des champignons. Dans le texte, ils continueront à être appelés ainsi par commodité. En fait, ces champignons, proches des algues, appartiennent au règne des Stramenopila, au phylum des Oomycota, à l'ordre des Péronosporales et à la famille des

Pythiacées (Ulloa et Hanlin, 2000). Ces agents pathogènes provoquent de graves maladies sur une large gamme de plantes cultivées ou spontanées, sous toutes les latitudes et dans différentes régions climatiques du monde (Newhook *et al.* 1978).

Grâce aux travaux de Waterhouse (1963) et Waterhouse et Stamps (1970), une clef de classification des agents pathogènes du genre *Phytophthora* a été publiée et actualisée. Cette clef, utilisée à travers le monde, est basée sur les caractères morphologiques. Ainsi, la pourriture brune a longtemps été considérée comme le fait de la seule espèce *P. palmivora*, qui pouvait présenter des formes morphologiques différentes. Mais l'importante diversité observée ainsi que l'évolution des caractères morphologiques pris en compte ont montré les limites de cette méthode.

L'observation fine en microscopie optique de plusieurs isolats d'origines diverses a permis de mettre en évidence des différences fondamentales au niveau de leurs caryotypes (Sansome *et al.* 1975). Certains isolats présentaient une plaque métaphasique formée de 5 à 6 gros chromosomes, alors que chez d'autres, 10 à 12 petits chromosomes pouvaient être dénombrés. Cette découverte a conduit à douter de l'unicité des espèces du genre *Phytophthora* susceptibles de provoquer la pourriture brune des cabosses. Au cours d'un atelier mondial qui s'est tenu à Rothamsted (Royaume-Uni) en 1976, il a été reconnu que les différences observées entre les isolats n'étaient pas dues à des variations morphologiques au sein d'une seule espèce, mais que la maladie était en fait causée par plusieurs espèces de *Phytophthora*. Depuis lors, au moins quatre espèces distinctes de *Phytophthora* ont été identifiées sur cacaoyer (Griffin, 1976 ; Zentmyer *et al.*, 1977) :

- *Phytophthora palmivora* (Butler) ;
- *Phytophthora megakarya* (Brasier & Griffin) ;
- *Phytophthora capsici* (Kaosir & Zentmyer) ;
- *Phytophthora citrophthora* (Keliām & Zentmyer).

L'évolution des techniques d'analyse a conduit à l'utilisation de nouveaux outils, biochimiques ou moléculaires, tels que l'électrophorèse des protéines totales, l'analyse isoenzymatique, l'hybridation ADN-ADN *in-situ*, le polymorphisme de longueur des fragments de restriction de l'ADN (RFLP), la détection d'ADN polymorphe amplifié au hasard (RAPD) (Erselius et Shaw, 1982 ; Förster *et al.*, 1987 ; Blaha, 1990 ; Goodwin, 1991 ; Nyassé, 1997).

Ces méthodes apportent souvent des résultats complémentaires, permettant de mieux caractériser les limites entre espèces.

Certaines espèces de *Phytophthora* apparaissent inféodées à des aires géographiques données. L'espèce *P. palmivora* est présente dans pratiquement toutes les zones de cacaoculture et dominante en Afrique de l'Ouest. *P. capsici* est le parasite dominant sur le continent américain. *P. citrophthora*, dont l'importance économique est actuellement négligeable, a été isolé en Côte d'Ivoire et est aussi présent au Brésil. Nous insisterons sur *P. megakarya* qui, considérée comme l'espèce la plus agressive et ayant un pouvoir de dissémination plus grand que celui des autres espèces (Babacauh, 1983a), constitue une menace potentielle pour les grands bassins de production.

1.2.2. Structure des populations de *Phytophthora megakarya*

P. megakarya aurait une origine africaine, alors que le cacaoyer est natif du continent américain. Il est probable que ce parasite ait évolué au départ sur des plantes natives africaines comme le kolatier (*Cola nitida*), qui est aussi une Sterculiacée. Il se serait ensuite déplacé vers le cacaoyer qui s'est révélé un hôte particulièrement sensible (Nyassé, 1997). Il a été isolé dans les pays d'Afrique Centrale et de l'Ouest (Gabon, Cameroun, Nigeria, Togo, Ghana). Ce sont les pays où les dégâts sont les plus importants (jusqu'à 50 % de la production nationale).

Des systèmes isoenzymatiques ont été utilisés pour étudier la diversité génétique de 161 isolats (Nyassé *et al.*, 1999). Cette étude a révélé que *P. megakarya* comprend deux grands groupes distincts : un groupe homogène rassemblant les isolats de l'Afrique de l'Ouest et un groupe hétérogène rassemblant ceux de l'Afrique Centrale. Un petit groupe intermédiaire est constitué d'isolats (prélevés au Cameroun près de la frontière avec le Nigeria) ayant à la fois des bandes spécifiques d'Afrique Centrale et d'Afrique de l'Ouest.

1.2.3. La reproduction

Les organes reproducteurs des champignons se forment généralement lorsque le mycélium végétatif a atteint un certain degré de développement et accumulé une base

alimentaire suffisante. Ce moment coïncide souvent avec l'épuisement du milieu, mais d'autres conditions telles que la température et la lumière influent également le phénomène (Meulemans, 1989). Le cycle biologique des *Phytophthora* est résumé dans la figure 1.1. Il comporte deux phases : une phase végétative ou asexuée ou encore imparfaite, et une phase sexuée ou parfaite (Blaha, 1995).

1.2.3.1. La reproduction sexuée

La reproduction sexuée se fait par l'union d'une anthéridie (organe mâle) et d'une oogone (organe femelle). Il en résulte des oospores sphériques de teinte jaune-claire, à paroi assez épaisse (1 à 2 μm). Les oospores sont des organes de dormance qui peuvent constituer une réserve de variabilité génétique dont les limites des potentialités ne sont pas bien connues (De Vallavieille, 1983).

Le système de reproduction sexuée sépare les espèces de *Phytophthora* en trois catégories : les espèces homothalliques, hétérothalliques et celles où aucune phase sexuée n'a encore été observée (De Vallavieille, 1983). L'hétérotallisme caractérise la formation des gamètes mâles et femelles sur des hyphes différents. Ainsi une souche de type A1 doit être confrontée à une souche complémentaire de type A2 pour former des spores sexuées (oospores). Pour ce qui est de l'homothallisme, les gamètes se forment sur un même mycélium. Les oospores diploïdes germent dans les conditions favorables et permettent ainsi la formation des sporocystes.

In vivo, la reproduction sexuée est rare. Au champ, le rôle des oospores dans les types hétérothalliques n'est pas bien compris, mais il semble que le croisement des types A1 et A2 permette la formation de nouvelles races ou biotypes (Flament, 1998). *P. megakarya*, par exemple, est un champignon hétérothallique à dominance de type sexuel A1 sur cacaoyer au Cameroun, d'où la prédominance de la reproduction clonale ou asexuée.

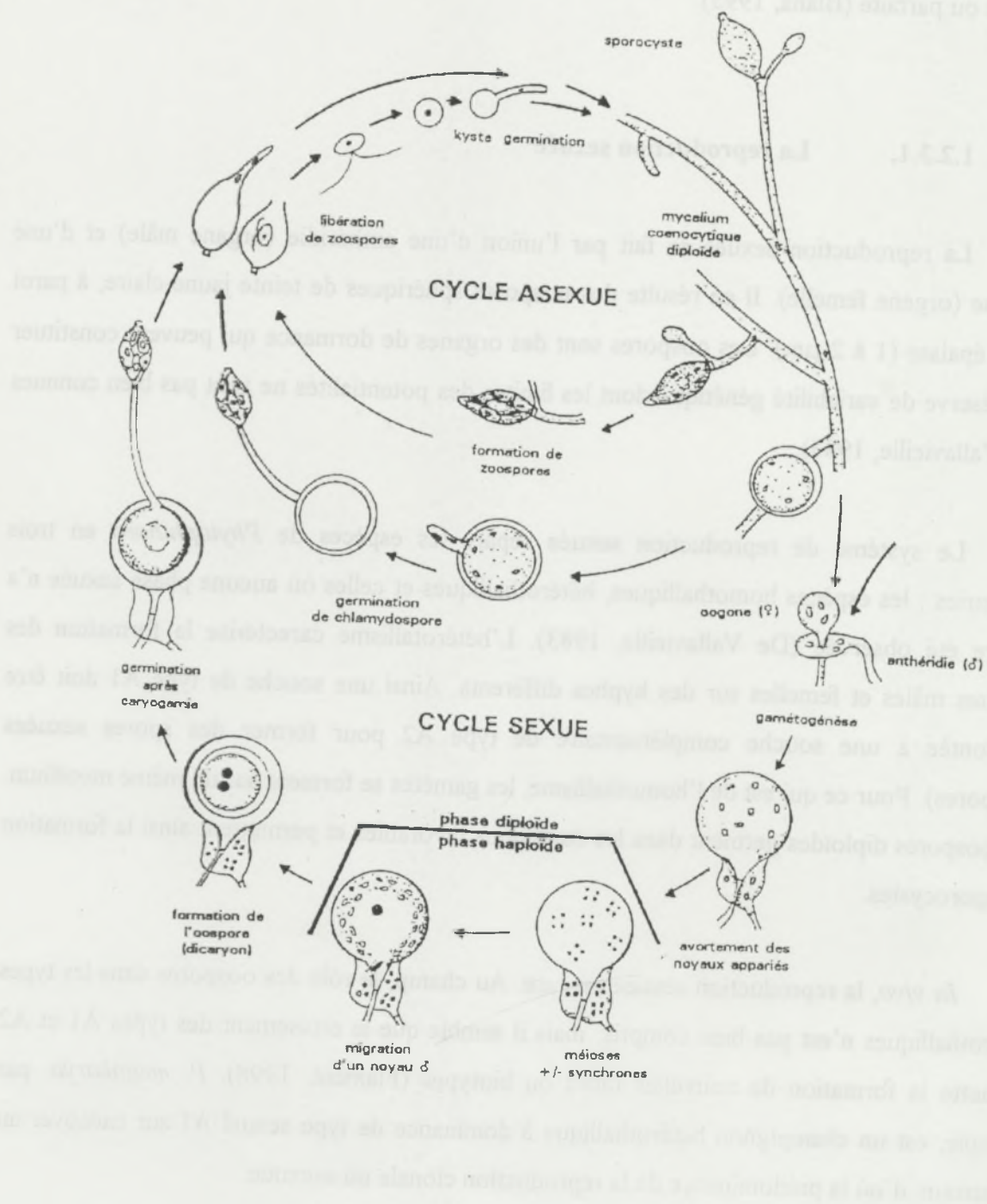


Figure 1.1 : Cycle biologique de *Phytophthora*, d'après Shaw (1988) et Brasier (1992)

1.2.3.2. La reproduction asexuée

A partir d'un thalle mycélien, des sporocystes se forment dans les conditions d'humectation, d'humidité et de température satisfaisantes. Ces sporocystes sont des organes de multiplication végétative par excellence. Leur maturation et leur germination dépendent également des conditions d'humectation, d'humidité et de température (Rotem, 1978 ; Duniway, 1979). La dessiccation et le fort rayonnement solaire leur sont défavorables et létaux. L'appauvrissement du milieu en éléments nutritifs est souvent mentionné dans la littérature comme étant en faveur de la formation des sporocystes et de leur germination (Duniway, 1979).

La germination des sporocystes aboutit à la libération de spores biflagellées (zoospores). Celles-ci nagent dans les films d'eau présents à la surface des organes végétaux, avant de s'encyster et émettre ensuite un tube germinatif qui sera à l'origine des infections, ce qui lie l'importance des maladies à *Phytophthora sp* à la libération des zoospores. Certaines espèces produisent des chlamydospores multinuclées sphériques, intercalaires ou terminales. Ces organes de conservation germent en émettant un ou plusieurs tubes germinatifs dont l'apex peut se différencier en sporocyste (Mac Donald et Duniway, 1978).

Les zoospores peuvent d'abord réaliser, à l'aide de leurs flagelles, leur propre locomotion sur quelques centimètres. Ensuite une dispersion passive peut être faite soit sur une courte distance (phénomène de splashing), soit sur une plus grande distance, assurée par les courants d'eaux d'irrigation, de pluie, ou de ruissellement (Hickman et Ho, 1966 ; Duniway, 1983). Certains auteurs parlent de l'attraction chimique des zoospores par des organes des végétaux, tandis que d'autres auteurs parlent plutôt de l'attraction bioélectrique de la part de ces mêmes organes, surtout en ce qui concerne les agents pathogènes du sol.

Quelle que soit la voie utilisée par les zoospores pour leur motilité, l'eau demeure indispensable. En l'absence d'eau, les sporocystes subissent une germination dite directe par opposition à la première, celle de la libération des zoospores, appelée indirecte. La germination directe permet aux sporocystes d'émettre directement un tube germinatif (Duniway, 1979 ; Boccas, 1979).

La dissémination des espèces du genre *Phytophthora*, qu'elles soient aériennes ou telluriques, est essentiellement assurée par les organes de reproduction asexuée qui sont principalement à l'origine des épidémies. Les facteurs climatiques conditionnant la formation,

la maturation et la germination de ces organes confinent généralement leur activité pathogène à une période particulière de l'année, sur les plantes cultivées au champ (Zentmyer, 1980).

1.3. La maladie : la pourriture brune des fruits due à *Phytophthora* spp

1.3.1. Importance socio-économique

La pourriture brune des fruits, curieusement dénommée « black pod » par les auteurs anglophones (ce qui peut conduire à une confusion avec la pourriture noire des cabosses due à *Botryodiplodia theobromae*) est la plus la plus importante de toutes les maladies du cacaoyer (Braudeau, 1969). Les organismes qui en sont responsables, des *Phytophthora*, attaquent le cacaoyer au niveau des racines, des feuilles, du tronc et des fruits. Les attaques sur feuilles, limitées aux pépinières, provoquent des dégâts peu importants. Le chancre du tronc est à l'origine de dommages considérables en Papouasie-Nouvelle-Guinée. En Afrique et en Amérique Latine, cette manifestation est rare. En revanche, la pourriture brune des fruits cause des dégâts qui, bien que variant d'un pays à l'autre, peuvent être très importants.

Les pertes s'élèvent à environ 30 % de la production potentielle sur le plan mondial. En Afrique, ces pertes sont de 15 à 20 % en Côte d'Ivoire et au Ghana, 30 à 75 % au Nigeria, plus de 50 %, voire 80 % dans les parcelles paysannes au Cameroun, au Gabon et en Guinée équatoriale, où dominent les attaques de *P. megakarya* (Muller, 1972 ; Partiot *et al*, 1984 ; Despréaux *et al*, 1989) . En Amérique latine, les dégâts peuvent aussi être importants sur le plan économique : 20 à 30 % au Brésil, 20 % au Venezuela, 20 à 40 % au Mexique (Ortiz-Garcia *et al.*, 1994). En Asie du Sud-Est les pertes sont estimées à 15-20 % (Despréaux *et al.*, 1989).

1.3.2. Etiologie et symptomatologie

Chez le cacaoyer, la pourriture brune est provoquée par un champignon du genre *Phytophthora*. Plusieurs organes de *Phytophthora* (hyphes, sporocystes, chlamydospores) sont susceptibles de provoquer la maladie sur les fruits, quel que soit leur stade de développement (Babacauh, 1982). Mais les zoospores joueraient le rôle de dissémination le plus important.



Photo 1.3 : Fruits attequés par *Phytophthora spp* en zone médiane. A gauche : *P. palmivora* ; à droite : *P. megakarya*. (Source : Commonwealth Mycological Institute, cité par Nyassé, 1997)

La maladie est caractérisée par l'apparition sur le cortex des fruits d'une petite tache d'abord translucide, qui brunit en 24-48 heures et s'étend plus ou moins rapidement selon les géotypes des cacaoyers et l'agressivité des souches. Cette tache se couvre après quelques jours de fructifications qui forment un revêtement blanc-crème plus ou moins abondant (photo 1.3). Après une dizaine de jours, les fruits affectés sont totalement détruits et leurs fèves inutilisables en chocolaterie (Blaha et Lotodé, 1976 ; Lass, 1985). En fin d'évolution, les fruits restent attachés sur l'arbre sous forme momifiée.

1.3.3. Les méthodes de lutte

1.3.3.1. Lutte génétique

Une des méthodes de contrôle reste le développement des géotypes présentant un niveau élevé de résistance à la pourriture brune des fruits. La résistance du cacaoyer à cet agent pathogène est supposée de type non spécifique et partielle (Chevaugéon, 1973 ; Partiot, 1976). Jusqu'à présent, aucune résistance complète à cette maladie n'a été mise en évidence ; la résistance serait de nature polygénique et quantitative. Au Cameroun, les clones identifiés comme les plus résistants voient encore la majorité de leurs fruits attaqués par cette maladie, plus particulièrement dans des conditions très favorables à l'épidémie. L'analyse d'un essai diallèle suggère que les descendances les plus attaquées sont celles dont la période de maturation des fruits est la plus longue ; la durée d'exposition des fruits semble donc être un paramètre important dans les épidémies (Berry et Cilas, 1994b).

Malgré un nombre important de travaux sur la résistance du cacaoyer à la pourriture brune, très peu de variétés présentant un niveau de résistance élevé ont été sélectionnées. Les travaux de sélection se sont heurtés à une mauvaise connaissance de l'agent pathogène, la découverte de plusieurs espèces de *Phytophthora* ne datant que des années 1980, et aussi à la difficulté d'évaluer la résistance. Actuellement, une résistance durable est recherchée, ce qui passe par une meilleure compréhension du déterminisme génétique, c'est-à-dire des facteurs génétiques impliqués dans la détermination des caractères de résistance au *Phytophthora* (Flament, 1998).

Tableau 1.3 : Recommandations de l'IRAD pour la lutte chimique contre la pourriture brune des cabosses du cacaoyer au Cameroun (Epidémiologie dans la zone agro-écologique forestière à pluviométrie bimodale).

Modalités techniques	Fongicide utilisé	Nombre de traitements	Concentration de la bouillie	Consommation en fongicide
1. Fongicides de contact (Pulvérisation dose simple)				
• 1 ^{ère} saison des pluies (sur tronc uniquement) : intervalle de 2 semaines entre traitements	Oxyde cuivreux (50% de Cu)	5 à 6	0,5 % de pc (75 g / 15 l)	80 l/ha/trt (400 g/trt)
• 2 ^{ème} saison des pluies (sur arbre entier) : intervalle de 2 semaines entre traitements	Oxyde cuivreux (50% de Cu)	5 à 6	0,5 % de pc (75 g / 15 l)	250 l/ha/trt (1 250 g/trt)
2. Fongicides de contact et pénétrant (Pulvérisation dose simple)				
• 1 ^{ère} saison des pluies (sur arbre entier) : intervalle de 2 semaines entre traitements	Oxyde cuivreux (50% de Cu)	4	0,5 % de pc (75 g / 15 l)	180 l/ha/trt (900 g/trt)
• 2 ^{ème} saison des pluies (sur arbre entier) : intervalle de 3 semaines entre traitements	Métalaxyl / Cuivre	4	0,33 % de pc (50 g / 15 l)	250 l/ha/trt (830 g/trt)
3. Fongicides de contact et pénétrant (Pulvérisation dose triple)				
• 1 ^{ère} saison des pluies (sur arbre entier) : intervalle de 1 mois entre traitements	Oxyde cuivreux (50% de Cu)	2	1,5 % de pc (225 g / 15 l)	180 l/ha/trt (2 700 g/trt)
• 2 ^{ème} saison des pluies (sur arbre entier) : intervalle d'un mois entre traitements	Métalaxyl / Cuivre	2	1 % de pc (150 g / 15 l)	250 l/ha/trt (2 500 g/trt)
4. Fongicides de contact et pénétrant (Atomisation dose triple)				
• 1 ^{ère} saison des pluies (sur arbre entier) : intervalle de 1 mois entre traitements	Oxyde cuivreux (50% de Cu)	2	4,5 % de pc (450 g / 10 l)	80 l/ha/trt (3 600 g/trt)
• 2 ^{ème} saison des pluies (sur arbre entier) : intervalle de 1 mois entre traitements	Métalaxyl / Cuivre	2	2 % de pc (200 g / 10 l)	140 l/ha/trt (2 800 g/trt)

pc=produit commercial ; trt=traitement

Source : Berry (1999).

1.3.3.2. Lutte chimique

Aucune sélection pour la résistance à la pourriture brune n'ayant encore abouti à du matériel suffisamment performant, les méthodes de lutte actuellement préconisées dans la plupart des pays producteurs sont le plus souvent des interventions phytosanitaires, pendant les périodes épidémiques, à base de traitements fongicides sur les organes cibles de la maladie : les fruits.

Au Cameroun, les produits utilisés pour traiter les cacaoyères contre la pourriture brune sont de deux types :

- les dérivés cupriques (oxyde ou hydroxyde de cuivre) utilisés dans les formulations dosées à raison de 50 % de cuivre de métal ;
- les produits à base d'un mélange de métalaxyl (12 %) et d'oxyde cuivreux (60 %).

L'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD) propose plusieurs méthodes de traitement chimique (tableau 1.3). Le choix de l'une d'elles dépend du degré de pression infectieuse, des particularités écologiques de la cacaoyère à protéger, de la nature du matériel végétal ou du niveau du potentiel de production de la parcelle. Par exemple, les méthodes de lutte à concentration élevée et nombre réduit de traitements, qui se sont toujours montrés très efficaces, ne doivent être mises en œuvre que sur des parcelles potentiellement productives avec pression infectieuse élevée (Berry, 1999). Comme tous les produits phytosanitaires mis sur le marché, les fongicides que les cacaoculteurs utilisent sont soumis au préalable à des tests d'efficacité vis-à-vis de la maladie. Ce n'est que si ces expérimentations sont concluantes que le produit peut prétendre être homologué, l'idée étant de mettre à la disposition des producteurs une large gamme de fongicides. La diversification des traitements au cours de la saison a pour objectif de limiter le développement et l'incidence éventuelle des souches résistantes au métalaxyl.

Selon une enquête menée en 1993 par la Société de Développement du Cacao (SODECAO) au Cameroun, moins de 5 % des parcelles sont traitées selon les recommandations de l'IRAD. La plupart des parcelles (80 %) reçoivent moins de 7 applications par an sur l'ensemble de la plantation (Berry, communication personnelle). Parmi les raisons invoquées, on peut citer :

- L'indisponibilité de main d'œuvre : il y a peu de force de travail et les cultures vivrières sont prioritaires ;

- Les coûts élevés des traitements fongicides. Au Cameroun, pendant la campagne cacaoyère 2001, un sachet de fongicide cuprique (fongicide de contact) coûtait en moyenne 300 F CFA, et un sachet de fongicide à base de métalaxyl (fongicide pénétrant) coûtait 650F CFA. Un producteur de la zone de forêt humide à pluviométrie bimodale qui décidait de traiter sa parcelle par pulvérisation à dose simple avec des fongicides de contact et pénétrants (tableau 1.3), avait besoin d'environ 60 sachets de fongicide de contact et 80 sachets de fongicide pénétrant par hectare et par an. Il dépensait donc pour les fongicides 70.000 FCFA, soit l'équivalent de 175 kg de cacao marchand (le prix au producteur d'1kg de cacao marchand revenant à 400F CFA environ), soit la moitié de sa production pour lutter uniquement contre la pourriture brune des fruits.

1.3.3.3. Lutte culturale

Il s'agit de l'ensemble des méthodes culturales permettant de créer des conditions défavorables au développement de l'agent pathogène ou de diminuer la pression d'inoculum. Ces mesures prophylactiques peuvent être utilisées en complément à d'autres méthodes de lutte pour renforcer leur efficacité. Parmi elles, nous pouvons citer la récolte sanitaire, qui consiste à débarrasser en début de campagne les arbres des restes de la campagne précédente et à éliminer régulièrement les fruits malades, sources potentielles d'inoculum secondaire. L'impact de cette mesure est très dépendante des facteurs climatiques ; son action se traduit surtout par une diminution de la vitesse d'évolution de l'épidémie sur les fruits situés sur les branches (Partiot *et al.*, 1984), notamment en conditions de pression d'inoculum modérée. La taille du cacaoyer consistant en une élimination de certaines branches, susceptible de produire une aération des parcelles et une diminution de l'hygrométrie ambiante, est également une mesure à envisager.

1.3.3.4. Lutte biologique

Les méthodes de lutte biologique visent à contrôler les interactions entre les agents pathogènes en utilisant leurs interactions avec les facteurs biotiques ou abiotiques de l'environnement. Ces techniques de lutte sont actuellement en voie d'extension, non seulement

dans les pays à agriculture de subsistance, mais également dans les systèmes de productions intensifs.

Le principe repose sur le fait que des relations d'antagonismes peuvent limiter le développement d'un agent phytopathogène via la compétition (pour les facteurs nutritifs, l'oxygène, l'espace), l'antibiose (phénomène d'inhibition d'un microbe par une substance inhibitrice ou toxique produite par un autre microorganisme), le parasitisme ou d'autres formes particulières d'interférence (Semal, 1989).

Des travaux menés par Odamtten et Clerk (1984) et Galindo (1992) en lutte biologique contre *Phytophthora palmivora* ont suggéré l'existence de potentiels agents de lutte contre ce champignon. Nwaga (1984) a montré que certains micro-organismes comme *Gliocladium roseum* produisent des substances fongistatiques faiblement inhibitrices de *P. palmivora*.

Au Cameroun, les travaux de lutte biologique contre le *P. megakarya* sont en cours. Cette voie de recherche a connu des échecs jusque là parce que certains micro-organismes efficaces en laboratoire ne l'ont pas été sur le terrain. Il s'agit maintenant d'isoler et de sélectionner, à partir des écosystèmes « cacao », des micro-organismes naturellement antagonistes du pathogène (Tondjè, communication personnelle).

La lutte intégrée, combinant méthodes agronomiques, lutte chimique, lutte génétique et lutte biologique semble donc être une voie prometteuse.

1.4. Epidémiologie

1.4.1. Epidémiologie des maladies fongiques aériennes - Généralités

1.4.1.1. Relations avec les facteurs environnementaux

Les conditions environnementales jouent un grand rôle dans l'expression d'une maladie. Ce sont les facteurs climatiques qui sont le plus souvent impliqués. Traditionnellement, le climat se définit comme l'ensemble des conditions atmosphériques propres à une région du globe et caractérisé par les états habituels du temps et leurs fluctuations au cours de leur

succession saisonnière. Friesland et Schrödter (1987) définissent comme « macroclimat » les conditions climatiques prévalant dans un rayon de 50 à 1000 km, le « mésoclimat » se référant au climat dans un espace de 100 m à 100 km, et le « microclimat » enfin se rapportant aux conditions climatiques dans un rayon de 1 mm à 300 m. Nous n'évoquerons ici que les facteurs climatiques (lumière, température, vent et humidité), car très peu d'études relatives aux facteurs pédologiques ont été conduites chez le couple cacaoyer - *Phytophthora*.

Dans le système épidémique, les facteurs climatiques correspondent aux variables de flux de premier rang tout particulièrement dans les régions à saisons contrastées ; celles de second rang correspondent aux pratiques culturales. C'est le climat qui gouverne en grande partie les changements quantitatifs d'états aux niveaux du parasite, de la maladie, de l'épidémie mais aussi de la population hôte (Rapilly, 1991).

1.4.1.1.1. Le rayonnement

La quantité de rayonnement est, en soi, rarement un facteur limitant pour le développement des parasites et la progression des épidémies (Rotem, 1978). Mais c'est la conséquence du rayonnement au niveau des températures et des flux de vapeur d'eau qui agit sur la maladie. Le rayonnement agissant sur le degré d'ouverture des stomates, peut favoriser ou non les contaminations des parasites qui pénètrent dans l'hôte (Rapilly, 1991).

Tarjot (1971) a pu établir que sous l'effet de l'éclairement, les fruits du cacaoyer sont moins sensibles que ceux non éclairés, mais n'a pas précisé s'il s'agissait d'un effet direct ou indirect. Blaha (1983) a identifié la lumière comme un facteur inhibiteur de la croissance chez différentes espèces de *Phytophthora*. Efombagn (1999) a également montré que la croissance *in vitro* des isolats est influencée par la lumière. Cette croissance est lente en lumière continue, rapide à l'obscurité et moyenne en lumière alternée (12 heures de lumière / 12 heures d'obscurité).

1.4.1.1.2. La température

La température joue un rôle important dans toutes les phases de développement du parasite (Friesland et Schrödter, 1988). Trois températures sont prises en compte en épidémiologie : la température de l'air, celle qui correspond au point de rosée et celle de l'organe sensible ou malade. Celle-ci est plus difficile à connaître, mais combinée avec celle du point de rosée elle conditionne, pour partie, la formation ou la disparition d'un film d'eau dont la présence sur les organes végétaux est importante pour de nombreux parasites (Rapilly, 1991).

Les fluctuations saisonnières et journalières des températures influencent le taux de développement de certaines maladies (Kushalappa, 1990). Elles sont directement dépendantes de la qualité et de la quantité de rayonnement. Lors des inoculations artificielles, des optimums de température favorisant le développement des symptômes ont été déterminés à la suite de plusieurs expérimentations (Brasier et Griffin, 1979).

1.4.1.1.3. Le vent

Le vent a un rôle essentiel dans la dissémination à plus ou moins grande distance de particules inertes (poussières, grains de sable) et d'organismes vivants végétaux (pollens, graines) ou animaux (acariens, pucerons). De façon moins visible en raison de la taille microscopique des particules incriminées, le vent contribue également à la dissémination des agents des maladies des plantes, parmi lesquels de nombreux champignons (Sache, 1999). Le vent agit aussi sur les flux de chaleur et de vapeur d'eau qui s'établissent au sein d'un couvert végétal. C'est plus par ses turbulences et ses changements brutaux de direction qu'il joue un rôle dans la libération (arrachement des unités de dissémination du tissu végétal à partir duquel elles sont produites) et le transport, et donc sur la fraction allo-inoculum qui se dépose sur une parcelle donnée (Rapilly, 1991).

1.4.1.1.4. L'humidité

L'humidité peut se matérialiser par la présence de rosée, d'eau de pluie ou d'irrigation sur la surface de la plante ou dans le sol, ou par la présence de fines gouttelettes d'eau dans l'air (Humidité Relative) ou encore comme vapeur. Sous ces différentes formes, elle peut être déterminante dans l'expression et le développement d'une maladie (Parry, 1990). Les parasites fongiques et les épidémies qu'ils provoquent requièrent, pour au moins une séquence de leur cycle infectieux, de l'eau liquide ou vapeur. Ce facteur, qui peut être limitant, est donc un élément essentiel à la compréhension des épidémies. Son absence peut provoquer un arrêt parfois irréversible des événements biologiques. Inversement, sa présence, son abondance, sa persistance peuvent, à partir des seuils spécifiques à chaque parasite ou type de parasite, accélérer ou freiner les vitesses de déroulement des phénomènes (Rapilly, 1991).

Bien avant que les taxonomistes moléculaires aient montré la proximité entre Oomycètes et certaines algues, Roger (1954) a établi que les *Phytophthora* sont, à l'origine, des organismes aquatiques ayant peu à peu évolué pour vivre dans les sols mouillés et à l'air humide. Selon cet auteur, presque tous ces champignons ont encore conservé la possibilité de mener une vie aquatique ; elle reste même nécessaire à un stade particulier de leur cycle biologique. L'eau et l'humidité sont en effet indispensables pour les infections à *Phytophthora* intervenant sur les plantes (Brasier et Hansen 1992).

Tarjot (1971), lors d'une étude de l'impact de différents facteurs environnementaux sur le développement de la pourriture brune (due à *Phytophthora palmivora*) en Côte d'Ivoire, a noté qu'une augmentation de la teneur en eau des tissus du péricarpe était en relation avec l'augmentation de la sensibilité du fruit. Il a également observé qu'une humidité relative élevée augmente la sensibilité du fruit, de même qu'elle exerce une action favorable sur le développement du champignon.

La connaissance de ces facteurs climatiques a de nombreuses applications en épidémiologie. La plus importante est sans nul doute les « avertissements agricoles », qui sont une technique de prévision de risques de contamination associée à un conseil de traitement (Rapilly, 1991). La connaissance de l'environnement physique de la plante et notamment des conditions d'humidité peut permettre de suivre le développement de la plante cultivée (stades

phénologiques) et donc de repérer, de situer dans le temps certaines phases sensibles de la plante dont on étudie un parasite (Choisnel, 1979).

1.4.2. Dynamique temporelle des épidémies

Dans le cadre d'une étude épidémiologique, on distingue habituellement une phase de conservation de l'inoculum suivie d'une succession de phases de dispersion et d'infection par ce dernier.

Beaucoup de champignons phytopathogènes développent des structures spécialisées de résistance vis-à-vis des facteurs défavorables de l'environnement. Les spores sexuées ou asexuées constituent, entre autres, des formes de conservation de l'inoculum en conditions de milieu défavorables. Les oospores des Oomycètes par exemple, peuvent survivre à l'état latent pendant de très longues périodes dans les sols en l'absence de plante-hôte (Lepoivre, 1989).

Dans le cas des espèces du genre *Phytophthora* sur cacaoyer, la source d'inoculum primaire n'est toujours pas clairement identifiée. Thorold (1975) a montré au Nigeria que le parasite pouvait être piégé à partir du sol même en dehors des périodes épidémiques. La quantité de cet inoculum souterrain subit des variations saisonnières importantes (Okaisabor, 1970). Selon Muller (1974a), la source d'inoculum la plus efficace serait également le sol, les fruits les plus bas étant contaminés par projection de particules de terre contenant des propagules infectieuses lors des pluies. Ces premiers résultats ont incité les chercheurs à voir dans la phase tellurique un maillon important dans l'évolution de l'épidémie.

Pendant la saison sèche, la présence du champignon a aussi été révélée sur les cabosses momifiées restées sur l'arbre ainsi que les déchets de l'écabossage (Muller, 1974b; Medeiros, 1976), dans certains coussinets floraux (Babacauh, 1980) et dans quelques chancres. La participation potentielle de plusieurs sources primaires d'inoculum (écorces, coussinets floraux, interface sol-racines) a également été évoquée, la source secondaire étant le fruit contaminé où l'agent pathogène a atteint le stade sporulant (Maddison et Griffin, 1981).

Une fois les conditions environnementales devenues favorables, le parasite peut être disséminé par plusieurs moyens : le matériel de propagation des plantes, le vent, l'eau, les vecteurs (insectes, oiseaux, activités anthropiques...)

Pour ce qui est de la pourriture brune des fruits du cacaoyer, la dissémination des propagules infectieuses pourrait se faire par le sol, les éclaboussures provoquées par la chute des gouttes de pluies sur le sol, les eaux de drainage, le vent, mais surtout les insectes, notamment les fourmis (Babacauh, 1980), et d'autres êtres vivants comme les rongeurs (Muller, 1974b). L'homme pourrait également participer à cette dissémination par les outils et vêtements de travail contaminés, et par le transport des fruits. La propagation de la maladie des fruits malades vers les fruits sains se fait essentiellement par voie végétative, c'est-à-dire par libération de zoospores. Cependant au Brésil, on aurait rencontré des oospores de *Phytophthora* sur fruits (Kellam et Zentmyer, 1986), qui pourraient aussi participer au développement de la maladie.

Au Cameroun, l'analyse des attaques selon la hauteur des fruits dans les arbres montre que les premiers fruits atteints sont ceux les plus bas, au contact ou à proximité du sol (Muller, 1974b). De là l'infection gagne les cabosses de plus en plus hautes, en une progression ascendante. Des observations faites selon les mêmes modalités 10 ans plus tard dans la région Sud-Ouest du pays ont donné des résultats beaucoup moins marqués. Dans cette région, l'infection atteint d'emblée, dès le début de la campagne, tous les niveaux de l'arbre. Le phénomène ascensionnel n'est pas retrouvé. Ces divergences peuvent être expliquées par l'existence de deux schémas épidémiologiques très contrastés, dans le Centre et le Sud-Ouest, qui correspondent à des climats différents.

Le schéma épidémiologique principal est alors le suivant : en saison sèche, le parasite se maintient sous forme latente dans les racines des cacaoyers. Dès les premières pluies, des zoospores issues des sporocystes racinaires remontent en surface selon un géotaxisme négatif. Le transport jusqu'aux fruits est ensuite assuré par des aérosols qui peuvent atteindre tous les fruits dans les arbres, mais surtout ceux qui sont les plus proches du sol. Cette phase du cycle infectieux peut provoquer à elle seule des dégâts non négligeables. Lorsque les fruits malades ne sont pas retirés, la propagation de la maladie se poursuit en plus de cabosse en cabosse selon des séquences de tailles variables dont la moyenne est estimée à 3,5 cabosses.

L'observation quotidienne de l'évolution de la maladie sur une parcelle de 16 arbres a permis de confirmer que pendant la phase épidémique, le parasite progressait essentiellement de cabosse en cabosse (Maddison et Idowu, 1981). La pression infectieuse augmente notablement au

cours de la saison, même lorsque les fruits malades sont enlevés quotidiennement, c'est-à-dire avant leur entrée en phase de sporulation. Il existerait alors un cycle de multiplication du champignon autre que celui qui est observé sur les fruits. Les recherches d'un tel cycle sont restées vaines. Cependant le parasite a pu être isolé à partir des racines superficiellement désinfectées. L'hypothèse qui a été retenue comme la plus probable est qu'une émission importante de sporocystes se déroule à ce niveau durant la période épidémique.

Si la quantité de maladie présente dans une population est évaluée à différentes dates, les résultats peuvent être présentés sous forme d'une courbe. Cette courbe, généralement en S, représente l'évolution au cours du temps de la fraction de tissus (ou de fruits) malades. Elle permet d'analyser, de comparer et de comprendre les épidémies en pathologie végétale.

L'épidémie peut être dite d'intérêt simple (quand l'inoculum secondaire produit n'est pas à l'origine de nouvelles contaminations pendant le même cycle de végétation où les contaminations issues de l'inoculum primaire s'expriment) ou d'intérêt composé (quand les progressions épidémiques de maladie qui produisent un inoculum secondaire à l'origine de nouvelles contaminations pendant le même cycle végétatif de l'hôte où l'inoculum primaire a initié la maladie). De nombreuses études ont montré que la pourriture brune des cabosses du cacaoyer pouvait être qualifiée d'épidémie à intérêt composé (Medeiros, 1976 ; Ward et Griffin, 1981 ; Berry et Cilas, 1994b).

Le modèle se fonde sur l'hypothèse selon laquelle l'accroissement de la maladie au temps t est proportionnel au niveau de la maladie atteint à ce même temps t . Cette relation s'exprime par l'équation différentielle (Van der Plank, 1963)

$$dx = rx_t dt \quad (1.1)$$

où dx est l'accroissement de la maladie pendant l'intervalle de temps dt ; x_t est le niveau de la maladie au temps t et r est un facteur de proportionnalité (taux de progression de la maladie). Après intégration de l'équation (1.1) entre $t = 0$ et $t = t$, on obtient l'équation

$$x = x_0 e^{rt} \quad (1.2)$$

où : x_0 est la proportion de maladie au temps 0.

L'équation (1.2) illustre un accroissement exponentiel de la quantité de maladie en fonction du temps, telle qu'elle se manifeste en début d'épidémie. Ultérieurement cet accroissement va se retrouver limité par la réduction de la quantité de tissus sains susceptibles d'être infectés. Pour tenir compte de cette contrainte, Van der Plank (1963) a introduit le terme $(1-x)$, qui est la proportion de tissus sains et qui décroît avec le temps. Le ralentissement de l'épidémie peut donc être exprimé en transformant l'équation (1.1) comme suit :

$$dx = rx_i(1-x_i)dt \quad (1.3)$$

Cette équation (1.3) exprime que les tissus infectés (dx), deviennent eux-mêmes infectieux et contribueront à l'accroissement de l'inoculum pendant une même saison de culture. Après son intégration entre $t = 0$ et $t = t$, on obtient

$$x/(1-x) = x_0 e^{rt} \text{ ou } \log \frac{x}{1-x} = rt \quad (1.4)$$

Entre les temps t_1 et t_2 , la vitesse apparente de progression de l'épidémie est donnée par l'équation (1.5) suivante :

$$r = \frac{1}{t_2 - t_1} [(\log e \frac{x_2}{1-x_2}) - (\log e \frac{x_1}{1-x_1})] \quad (1.5)$$

Pour déterminer les conséquences des interventions phytosanitaires, Medeiros (1976) a cherché à définir les paramètres qui régissent la progression de la pourriture brune en champ. L'auteur a observé ainsi pendant deux années consécutives l'évolution de l'infection des cabosses dans deux régions : l'une à épidémie « forte » et l'autre à épidémie « faible ». Dans les deux cas, l'affection se déroule selon le schéma des maladies à intérêts composés (Van der Plank, 1963), où l'inoculum s'accroît avec le temps.

Le calcul de r a donné les résultats suivants :

- région à épidémie « forte » : $r = 0,033$
- région à épidémie « faible » : $r = 0,066$

Les régions à épidémie « forte » présentent un taux de progression plus faible, mais se caractérisent par une saison favorable à la maladie beaucoup plus longue. Par ailleurs Medeiros (1976) relie l'évolution de l'épidémie aux conditions climatiques, en particulier l'humidité relative et la pluviométrie.

Le r proposé par Van der Plank (1963) est calculé à partir des notations visuelles de la maladie (Rapilly, 1991). Les équations (1.1) à (1.5) supposent qu'il existe une relation proportionnelle constante r entre la quantité de tissus infectieux x et l'accroissement ultérieur de la maladie dx , hypothèse qui n'est pas toujours fondée. Ces équations supposent également que les tissus inoculés au temps t deviennent immédiatement infectieux en produisant des spores, alors qu'entre le moment de l'infection et le début de la sporulation s'écoule un temps p défini comme période de latence. Ces équations supposent enfin que les tissus infectieux produisent des spores pendant toute la durée de l'épidémie, alors qu'en fait, les tissus attaqués cessent d'être infectieux au temps $(t + i)$, à l'issue de la période infectieuse, i . La figure 1.2 illustre ces différentes périodes de temps qui correspondent aux divers états des tissus de la population hôte. La prise en compte des temps $(t-p)$ et $(t-i-p)$ permet de calculer deux autres vitesses épidémiques, notamment la vitesse réelle d'infection (R) et la vitesse contagieuse (R_i).

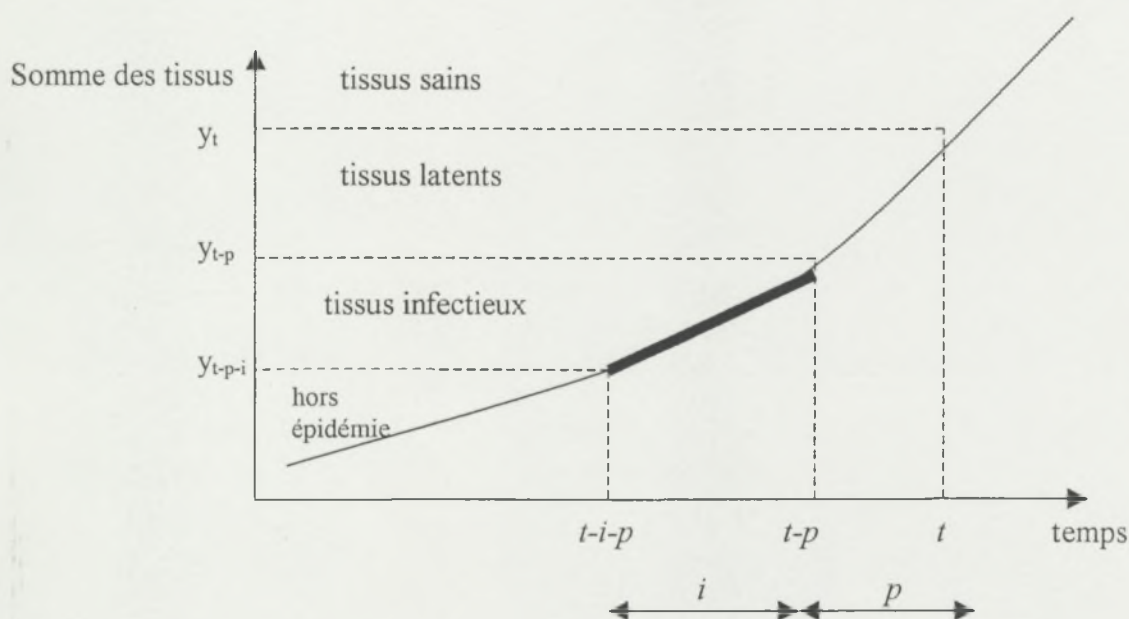


Figure 1.2 : Introduction de la durée de latence (p) et de la durée de vie des tissus contagieux (i) dans la prise en compte des temps à considérer pour connaître la vitesse contagieuse de progression d'une épidémie à intérêt composé (Sources : Campbell et Madden, 1990 ; Rapilly, 1991).

Par exemple, la vitesse réelle d'infection est donnée par la formule (Campbell et Madden, 1990) :

$$R = \frac{r y_t}{y_{t-p} - y_{t-i-p}} \quad (1.6)$$

où r est la vitesse apparente d'infection, y_t l'intensité de la maladie au temps t , y_{t-p} l'intensité de la maladie au temps $t-p$ et y_{t-i-p} l'intensité de la maladie au temps $t-i-p$.

Ward et Griffin (1981) ont montré que la progression de la pourriture brune des cabosses du cacaoyer pouvait être représentée par un modèle à intérêt composé, et ils estiment que la variation du taux d'infection (dont la valeur décroît) est due à trois facteurs :

- la progression (m) du nombre de cabosses au cours du temps ;
- la période (p) de latence ($p = 6$ jours) ;
- la période (i) de sporulation active ($i = 15$ jours).

Suivant les objectifs poursuivis, l'analyse temporelle d'une épidémie peut se faire à différents niveaux (Campbell et Madden, 1990) :

- A un premier niveau, il peut s'agir d'une comparaison globale de plusieurs traitements expérimentaux (essais d'applications de fongicides par exemple) en vue de définir une stratégie de gestion d'une épidémie. C'est peut-être le type d'analyse le plus pratiqué (Fry, 1982 ; Berger, 1988). On n'insiste pas beaucoup sur la modélisation ou sur l'interprétation de la courbe de progression de la maladie.

- A un deuxième niveau, les changements de certains facteurs environnementaux, du parasite ou la résistance de l'hôte dans un pathosystème induisent des changements dans l'expression de l'épidémie, symbolisés par des altérations de la courbe de progression de la maladie. Il faut alors modéliser et interpréter les variations des courbes.

- Le troisième niveau enfin correspond à l'épidémiologie comparative. En effet, lors de l'analyse pratiquée pour décomposer un système épidémiologique, il est fréquent, au fur et à mesure de l'identification de sous-structures de plus en plus simples, de constater des similitudes ou des différences fondamentales avec d'autres sous-ensembles appartenant à d'autres épidémies

mais qui retracent la même séquence. L'épidémiologie comparée peut donc permettre de réduire sensiblement les délais d'étude nécessaire à la compréhension de tel ou tel événement (Rapilly, 1991).

1.4.3. Dynamique spatio-temporelle

Les variations des épidémies peuvent également intervenir dans l'espace. Un principe simple mais important de la biologie est que « les organismes ne sont pas égaux en nombre partout ». Il existe toujours une hétérogénéité spatiale qui résulte de l'hétérogénéité environnementale et génétique et de la croissance des populations (Taylor, 1984). L'échelle spatiale peut être un organe de la plante (racine, feuille ou fruit), une plante, une parcelle, une région, un pays, un continent ou même une zone intercontinentale. Les agents pathogènes peuvent se déplacer d'une localité à une autre par plusieurs mécanismes : eau, vent, animaux, plantes infestées, action de l'homme... En général, ce sont les techniques de géostatistique qui sont utilisées pour évaluer et comparer les distributions spatiales des épidémies : test du nombre de liens entre plantes malades, analyses d'autocorrélations spatiales (Cliff et Ord, 1981). Ces techniques permettent aussi d'apprécier si la quantité de maladie provoquée par l'inoculum d'une unité de surface est indépendante ou non des unités de surfaces voisines. De telles analyses ont été effectuées pour des maladies attaquant d'autres cultures telles que le palmier à huile, le riz, le poivron (Van de Lande, 1993 ; Van de Lande et Zadoks, 1999 ; Ristaino et Johnston, 1999 ; Ristaino et Gumpert, 2000 ; Savary *et al*, 2001). Dans le cas du pathosystème cacaoyer – *Phytophthora*, aucune analyse spatio-temporelle n'a, à notre connaissance, encore été effectuée.

CHAPITRE 2 : RELATIONS ENTRE LA DYNAMIQUE EPIDEMIQUE DE LA POURRITURE BRUNE DES FRUITS DU CACAOYER ET LES VARIABLES CLIMATIQUES

2.1. Introduction

L'expression de la pourriture brune des fruits du cacaoyer au champ est influencée par de nombreux facteurs, notamment les conditions environnementales dans les plantations, la conservation du pathogène et sa dispersion, la souche et l'espèce pathogène présente et la nature génétique de l'hôte. Ces facteurs peuvent interagir pour favoriser ou au contraire, freiner le développement de la maladie. Par exemple, certains génotypes peuvent se révéler résistants dans un environnement donné, alors qu'ils se comporteront comme génotypes sensibles dans d'autres environnements. On parle alors d'interactions génotype – environnement. Même s'il est vrai que ces interactions sont difficilement estimables, nous nous intéresserons dans ce chapitre à l'incidence des facteurs environnementaux, plus particulièrement les facteurs climatiques, sur la dynamique de l'épidémie.

Les effets du climat sur le déroulement de l'épidémie sont connus dans les différentes zones de production de manière globale seulement. Au Cameroun par exemple, dans certaines localités de la zone agro-écologique à pluviométrie monomodale (zone IV, figure 2), l'incidence de la maladie a tendance à être plus élevée que dans celles de la zone à pluviométrie bimodale (zone V, figure 2). De même, une corrélation positive a été trouvée entre les taux d'attaque et la production potentielle, ce qui implique en partie que les conditions climatiques qui favorisent l'expression de la maladie sont les mêmes que celles adéquates pour la production (Muller, 1974a ; Despréaux, 1988). Toutefois cette tendance ne tient pas compte des variations climatiques observées à l'échelle d'une période de production, notamment l'alternance irrégulière des périodes sèches et pluvieuses et leur impact sur le déroulement et l'intensité de l'épidémie.

Quelles sont les relations entre les facteurs climatiques et l'expression de la maladie ? Existe-t-il des seuils de ces facteurs au delà desquels se déclenche la maladie ? Ce sont les questions auxquelles des éléments de réponse seront apportés dans cette partie, qui a pour

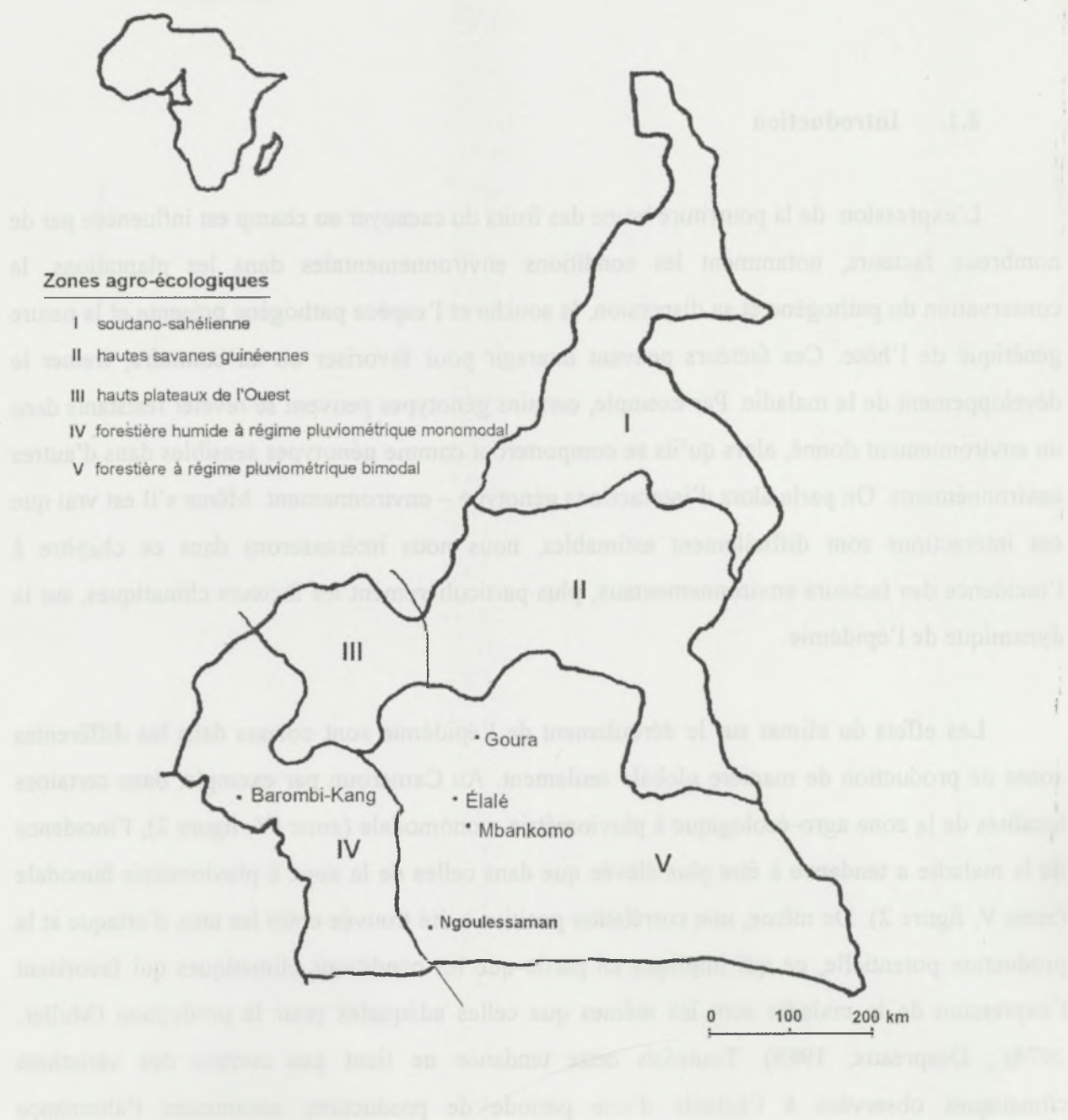


Figure 2 : Carte du Cameroun représentant les différentes zones agro-écologiques et les sites d'observations de l'étude.

Les travaux ont été menés conjointement en parcelles paysannes et en laboratoire. Les manipulations de laboratoire avaient pour objectifs d'apporter des informations complémentaires qui ne pouvaient pas facilement être obtenues en champ.

2.2. Matériel et méthodes

2.2.1. Travaux réalisés en parcelles paysannes

2.2.1.1. Description des sites et dispositif expérimental

Le Cameroun est subdivisé en cinq grandes zones agro-écologiques (figure 2). Les zones IV et V sont celles concernées par la production du cacao. Lors d'une prospection dans les bassins de production, plusieurs agriculteurs ont proposé de mettre à disposition une partie de leur cacaoyère pour cette étude. Les critères de choix ont essentiellement porté sur l'accessibilité, l'homogénéité et la taille de la parcelle. Trois parcelles situées à Mbankomo (province du Centre, département de la Mefou-Akono), Goura (province du Centre, département du Mbam-et-Kim) et Barombi-Kang (province du Sud-Ouest, département de la Mémé) ont été retenues. La contre-partie proposée était une petite indemnité financière et des fongicides pour traiter le reste de leur cacaoyère.

Mbankomo et Goura, situés à des altitudes de 730 m et 480 m respectivement, appartiennent à la zone agro-écologique à pluviométrie bimodale (figure 2.1), caractérisée par deux saisons sèches et deux saisons de pluies théoriquement de même longueur : une saison sèche de décembre à février, une saison des pluies de mars à mai (avec des précipitations de faible intensité), une deuxième saison sèche de juin à août et une autre saison des pluies de septembre à novembre (avec des pluies de forte intensité). Les sols y sont de type ferralitique, moyennement à fortement désaturé. Barombi-Kang, situé à une altitude de 180 m, appartient à la zone agro-écologique à pluviométrie monomodale (figure 2.1), caractérisée par un climat très humide et chaud, avec une longue saison des pluies (mars – novembre) et une saison sèche relativement courte (décembre – février). Les cacaoyères retenues sont âgées d'une quinzaine d'années à Barombi-Kang et à Goura, et de plus de 25 ans à Mbankomo (photo 2.1). Elles sont constituées de cacaoyers « tout venant », c'est-à-dire de nature génétique indéterminée.

Tableau 2.1 : Observations faites individuellement sur 180 fruits à Mbankomo

Variables	Modalités
Stade de développement	1 = Chérelle
	2 = Jeune cabosse
	3 = Cabosse saine verte
	4 = Cabosse mûre saine
Etat sanitaire	0 = Sain
	1 = Pourri
	2 = « Wilté »
	3 = Rongé
Lieu apparition 1ers symptômes	4 = Autre maladie
	1 = Zone apicale
	2 = Zone médiane
	3 = Zone distale

Tableau 2.2 : Echelle d'évaluation de la sévérité de la maladie sur les fruits

Note	Niveau d'infection	Observations
1	Absence de symptômes	Très résistant à la pénétration
2	1 à 5 lésions localisées	Résistant
3	6 à 15 lésions localisées	Modérément résistant
4	Plus de 15 lésions localisées	Partiellement résistant / Résistant au développement des lésions
5	1 à 5 lésions développées	Partiellement résistant / Résistant à la pénétration seulement
6	6 à 15 lésions développées	Modérément sensible
7	Plus de 15 lésions développées	Sensible
8	Lésions coalescentes	Très sensible

Source : Iwaro *et al.*, 1997b

Dans chacun des trois sites, le dispositif expérimental est constitué de 100 arbres disposés en un bloc contigu. Ce bloc est entouré d'une barrière de deux lignes de cacaoyers assurant un cordon sanitaire par rapport à la parcelle paysanne adjacente. Les arbres ont été compartimentés en trois niveaux : 0-0,5 m (niveau 1), 0,5-1,50 m (niveau 2) et > 1,50 m (niveau 3). Au sein d'une même parcelle, les écartements entre les arbres varient de 2,5 x 2,5 m à 3 x 3 m, ce qui donne des densités de 1111 à 1600 pieds à l'hectare. Les arbres morts n'étant pas systématiquement remplacés, de nombreux « trous » existent dans les différentes parcelles, diminuant ainsi les densités.

A Mbankomo, afin de suivre précisément la dynamique de la colonisation de la maladie dans l'arbre, 12 fruits ont été sélectionnés par arbre (4 fruits par niveau) et ceci sur 15 arbres, soit un total de 180 fruits suivis à partir du stade « chérelle ». Des étiquettes de bijoutier ont été utilisées pour marquer les fruits sélectionnés.

2.2.1.2. Variables mesurées

Les fruits pourris (atteints de pourriture brune), les fruits « wiltés » (dessèchement précoce), les fruits endommagés par les rongeurs, les fruits atteints d'autres maladies que la pourriture brune, les chérelles (fruits ayant atteint 4 cm de longueur), les jeunes cabosses (fruits ayant dépassé le stade de chérelle, mais n'ayant pas atteint la taille adulte), les cabosses adultes (fruits ayant atteint la taille adulte mais pas la maturité), et les cabosses mûres saines ont été comptés de façon hebdomadaire. Dans chaque parcelle élémentaire, le flux d'apparition des chérelles a été évalué sur 25 arbres pris au hasard. Les chérelles comptées ont ensuite été marquées avec des étiquettes de bijoutier, pour ne pas être recomptées au passage suivant. Ces décomptes des chérelles n'ont été faits qu'aux niveaux 1 et 2, les observateurs ayant des difficultés à atteindre les fruits du niveau 3 pour y accrocher des étiquettes.

Le tableau 2.1 résume les observations qui ont été faites sur les 180 fruits suivis individuellement à Mbankomo.

Dans chacun des sites, un pluviomètre a été installé à l'air libre et deux thermomètres ont été placés l'un en milieu ambiant et l'autre sous le couvert végétal de la cacaoyère. Les données de pluviométrie et les températures minimum et maximum ont été relevées quotidiennement.



Photo 2.1 : Cacaoyère en début de production (parcelle expérimentale de Mbankomo)

Les observations ont été faites pendant trois années consécutives (1999 à 2001). Chaque année, les relevés des variables d'état sanitaire et de production, faits de façon hebdomadaire, ont commencé dès l'apparition des premiers fruits (fin avril-début mai), et se sont poursuivis jusqu'à la fin de la campagne (fin novembre – décembre). Il y a donc eu une trentaine de semaines d'observations par site et par année. Après chaque passage, les fruits malades, rongés ou « wiltés » étaient prélevés des arbres et mis hors de la parcelle.

2.2.2. Travaux réalisés en laboratoire

2.2.2.1. Détermination de la durée d'humectation des fruits à différents stades de leur développement

Dans le but d'évaluer la durée d'humectation (présence d'eau libre) des fruits, 90 fruits à différents stades physiologiques (chérille, jeune cabosse, et adulte) ont été collectés en trois séries, espacées l'une de l'autre de deux semaines, dans la parcelle paysanne de Mbankomo et transportés en laboratoire. A l'aide d'un mini pulvérisateur à pistolet, ces fruits ont été arrosés pendant quelques minutes par une pluie artificielle. Trois types de papier (papier buvard, papier *Whatman* et papier filtre) ont ensuite été découpés, afin d'être appliqués à différentes zones (proximale, médiane et distale) sur le cortex des fruits. Les observations sur les fruits se sont faites toutes les 5 minutes jusqu'à décollement du papier et le temps après lequel chaque morceau de papier s'est décollé a été mesuré en minutes. Ce protocole simple a été défini en l'absence de capteurs permettant de mesurer avec plus de précision la durée d'humectation. Il a donc été considéré que la durée d'humectation des fruits correspondait globalement à la durée d'adhésion du papier au fruit.

2.2.2.2 Détermination du stade de plus grande sensibilité des fruits à l'attaque de *P. megakarya* en laboratoire

Afin d'identifier le stade de prédilection d'attaque du champignon, 90 fruits à différents stades physiologiques ont été collectés de façon aléatoire dans la parcelle paysanne de Mbankomo. Ces fruits ont été conservés dans des bacs couverts et immédiatement acheminés au laboratoire. 24 heures après la récolte, les fruits ont été rincés successivement

dans deux récipients différents contenant de l'eau distillée stérile, puis disposés dans des bacs d'inoculation recouverts suivant un dispositif complètement randomisé. Des papiers essuie-tout et buvard ont été déposés au fond de chaque bac, afin de conserver et homogénéiser l'humidité.

Une suspension de zoospores de la souche *NS231* de *P. megakarya* calibrée à 3.10^5 zoospores.ml⁻¹ a été pulvérisée sur les cabosses à l'aide d'un atomiseur (au moins 12 heures plus tard). Les cabosses ont ensuite été mises à incuber à l'obscurité dans des bacs couverts. Les observations des symptômes ont été faites 5 jours après incubation. L'évaluation des symptômes sur le cortex des cabosses a été basée sur la fréquence et la taille des lésions. Le code d'évaluation est une échelle de 8 niveaux de sensibilité (tableau 2.2).

2.2.3. Analyses statistiques

2.2.3.1 Variables dérivées

De nouvelles variables telles que le taux de pourriture (*TPOUR*), le taux de fruits « wiltés » (*TWIL*), le taux de fruits rongés (*TRON*), les températures moyennes et l'amplitude thermique (*Amp*) ont été dérivées de celles mesurées au champ.

Le mode de calcul du taux de pourriture hebdomadaire (*TPOUR_i*) a été inspiré des formules utilisées par Berry et Cilas (1994b) et De Jesus (1992). Les pertes dues à la pourriture ont été estimées par rapport à la production potentielle (hors fruits « wiltés », fruits rongés, fruits atteints d'autres maladies) selon la formule :

$$TPOUR_i = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} POU_i * 100}{JC_i + CA_i + \sum_{i=1}^{i=n} (POU_i + MS_i)} \quad (2.1)$$

où	<i>TPOUR_i</i>	=	taux de pourriture à la semaine <i>i</i>
	<i>n</i>	=	numéro de la semaine d'observation
	<i>POU_i</i>	=	nombre de fruits pourris à la semaine <i>i</i>
	<i>MS_i</i>	=	nombre de fruits mûrs à la semaine <i>i</i>
	<i>JC_i</i>	=	nombre de jeunes cabosses à la semaine <i>i</i>
	<i>CA_i</i>	=	nombre de cabosses adultes à la semaine <i>i</i>

Le taux de « wilt » et le taux de fruits rongés ont été calculés sur les mêmes bases, en remplaçant *POU* par *WILT* et *RON* respectivement dans la formule (2.1).

Les températures ambiantes et « sous-cacaoyères » minimales (TA_{min} , TC_{min}) et maximales (TA_{max} , TC_{max}), exprimées en degrés Celsius, représentent respectivement les moyennes des températures minimales et maximales des sept jours de la semaine. Les températures moyennes (TA_{moy} , TC_{moy}) sont les moyennes des températures minimales et maximales. L'amplitude thermique (Amp) a d'abord été calculée de façon quotidienne en faisant la différence entre les températures journalières maximum et minimum. Ensuite, une amplitude hebdomadaire a été calculée à partir des valeurs obtenues les sept jours de la semaine.

La pluviométrie hebdomadaire (*PLUVIO*), exprimée en millimètres, représente la somme des hauteurs des précipitations des sept jours de la semaine.

2.2.3.2. Graphiques et analyses de variance

Des graphiques (histogrammes et courbes) ont été tracés pour suivre l'évolution du taux de pourriture hebdomadaire et des variables climatiques pendant toute la période d'observation.

Pour chacune des variables dérivées, une analyse de variance a été effectuée par site et par année. Les données des trois années ont ensuite été regroupées pour rechercher les effets « site » et « année ». La transformation logarithmique ou angulaire des données brutes a souvent été nécessaire, pour remplir les conditions de validité du modèle linéaire général, notamment celle de l'homogénéité des variances.

Quand le test associé à l'analyse de variance a conduit au rejet de l'hypothèse nulle, la comparaison des moyennes a été faite par la méthode des contrastes.

On appelle *contraste* une combinaison linéaire des paramètres α_i

$$\psi = \sum_{i=1}^{I-1} c_i \alpha_i \quad (2.2)$$

avec

$$\sum_{i=1}^{I-1} \alpha_i = 0 \quad (2.3)$$

où I est le nombre de « traitements ».

La comparaison peut faire intervenir l'ensemble des I traitements ($i = I$) ou seulement quelques-uns d'entre eux ($i < I$) (Snedecor et Cochran, 1957 ; Tomassone et *al.*, 1993).

Les variables, mesurées chaque année pendant une trentaine de semaines consécutives, peuvent être assimilées à des séries chronologiques, c'est-à-dire des séquences de mesures ne suivant pas un ordre aléatoire. Pour fournir une description concise de ces séries et pour estimer le degré de relation entre l'incidence de la maladie et la pluviométrie, les autocorrélations et les corrélations croisées ont été calculées.

2.2.3.3. Calcul des autocorrélations temporelles et des corrélations croisées

Il s'est agi de mesurer, pour une même série, des corrélations décalées dans le temps. Ainsi, le coefficient d'autocorrélation ρ_k , de *décalage* (ou *période*) k a été calculé, en considérant les $T-I$ paires d'observations $(y_1, y_2), (y_2, y_3), \dots, (y_{T-I}, y_T)$, de la façon suivante (Box et Jenkins, 1976 ; Tomassone et *al.*, 1993 ; Bourbonnais, 2000) :

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=1}^{T-k} (y_t - \bar{y})(y_{t+k} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (2.4)$$

où \bar{y} représente la moyenne de la série.

L'ensemble des coefficients d'autocorrélation a servi à tracer le corrélogramme, qui est le graphe de ρ_k en fonction du décalage k .

Lors de l'étude de la fonction d'autocorrélation d'une série chronologique, la question qui se pose assez souvent est de savoir quels sont les termes ρ_k qui sont significativement différents de 0. Si aucun terme n'est significativement différent de 0, on peut en conclure que le processus n'est affecté ni de tendance ni de saisonnalité (Bourbonnais, 2000).

Le test d'hypothèse pour un terme ρ_k est donc le suivant :

$$\begin{aligned} H_0 : \rho_k &= 0 \\ H_1 : \rho_k &\neq 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

L'intervalle de confiance du coefficient ρ_k est donné par (Quenouille, 1949) :

$$\rho_k = 0 \pm t_{\alpha/2} \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (2.6)$$

où n est le nombre d'observations de la série, t est la statistique de Student et α est le seuil de signification (risque de première espèce).

Si le coefficient calculé $\hat{\rho}_k$ est à l'extérieur de cet intervalle de confiance, il est significativement différent de 0 au seuil α (en général $\alpha = 0,05$ et $t_{\alpha/2} = 1,96$).

Le test de Ljung et Box (1978) a permis d'identifier le processus de *bruit blanc* (c'est-à-dire une suite de variables aléatoires de même distribution et indépendantes entre elles).

En effet, un processus de *bruit blanc* implique que $\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_h = 0$, soit les hypothèses suivantes (Bourbonnais, 2000) :

$$H_0 : \rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_h = 0 \quad (2.7)$$

H_1 : il existe au moins un ρ_i significativement différent de 0.

Pour effectuer ce test, on recourt à la statistique Q de Ljung et Box (1978) qui est donnée par :

$$Q = n(n+2) \sum_{k=1}^h \frac{\hat{\rho}_k^2}{n-k} \quad (2.8)$$

où n est le nombre de décalages, $\hat{\rho}_k$ est l'autocorrélation empirique d'ordre k , et n est le nombre d'observations.

La statistique Q est distribuée de manière asymptotique comme un χ^2 (chi-deux) à h degrés de liberté. L'hypothèse de *bruit blanc* est rejetée au seuil α si Q est supérieure au χ^2 lu dans la table statistique au seuil $(1-\alpha)$ et h degrés de liberté.

Quant à la corrélation croisée r de décalage k de deux séries x_i et y_i , elle a été définie comme suit (Bourke, 1996) :

$$r_k = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_{i-k} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i ((y_{i-k} - \bar{y})^2)}} \quad (2.9)$$

où $i = 0, 1, 2, \dots, T-1$; \bar{x} représente la moyenne de la série x_i et \bar{y} est la moyenne de la série y_i .

2.2.3.4. Analyses en régression multiple

Pour trouver le sous-ensemble des variables climatiques qui donne la meilleure équation pour prédire le taux de pourriture brune, une régression multiple a été effectuée. Afin de supprimer l'autocorrélation présente dans la série relative à l'incidence de la maladie (*TPOUR*), la série a été différenciée, c'est-à-dire que chacun de ses éléments y_i a été remplacé par la différence avec l'élément (y_{i-k}) , de façon à la rendre stationnaire (Kendall, 1976). Au vu des résultats des analyses d'autocorrélation, la différenciation s'est faite au premier et au second ordres (k a varié de 1 à 2). Une transformation angulaire de la variable *TPOUR* ($\text{Arcsinus} \sqrt{\text{TPOUR}}$) a également été effectuée, pour pouvoir remplir les conditions de validité du modèle linéaire général, notamment l'homogénéité de la variance.

Le modèle testé a été le suivant pour des variables climatiques X_1, X_2, \dots, X_n :

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2.8)$$

où Y représente la variable à expliquer (taux de pourriture moyen), α est l'ordonnée à l'origine, $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ les coefficients partiels de régression et ε est la résiduelle, qui est supposée suivre une distribution normale de moyenne nulle et de variance σ^2 .

Ces analyses ont été effectuées par site et par année dans un premier temps, puis par site en combinant les données des trois années.

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel SAS version 8.2 (SAS, 2001).

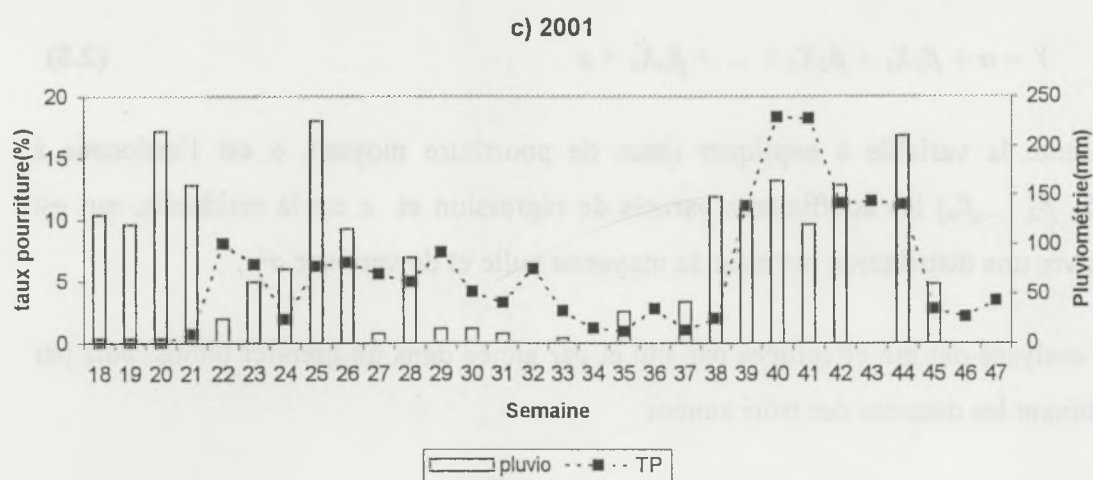
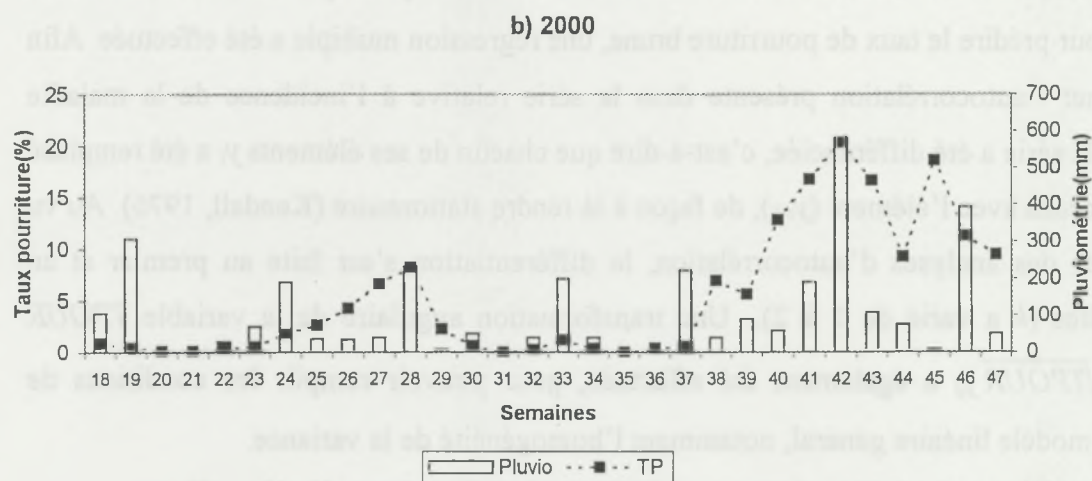
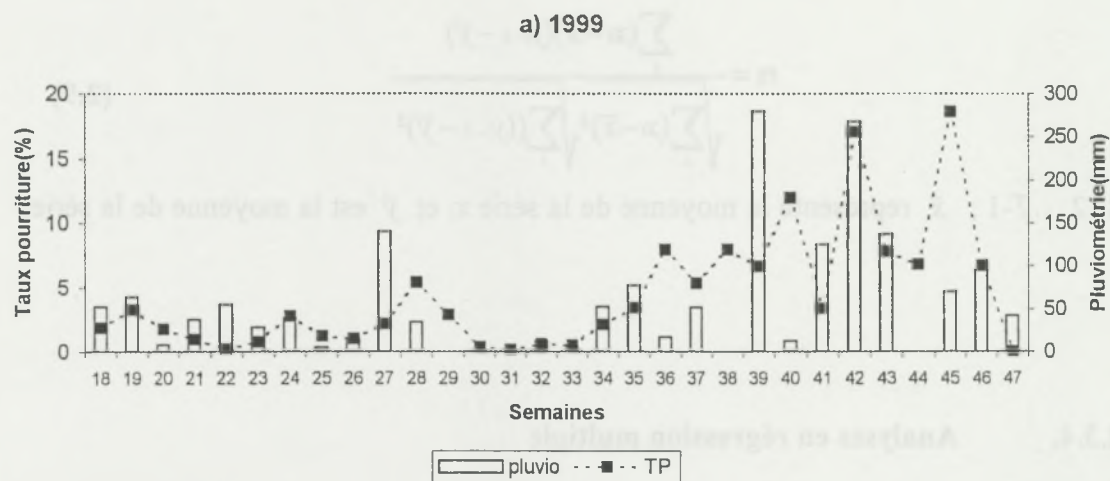


Figure 2.1 : EVOLUTION DU TAUX DE POURRITURE HEBDOMADAIRE ET DE LA PLUVIOMETRIE A MBAKOMU

2.3. Résultats

2.3.1. Expériences en parcelles paysannes

Les figures 2.1 à 2.6 représentent l'évolution du taux de pourriture hebdomadaire, de la pluviométrie et des températures dans les différents sites.

Chaque année à Mbankomo, la courbe du taux de pourriture a globalement présenté deux pics, marquant ainsi les deux saisons de pluies séparées par une courte saison sèche qui prévalent dans ce site (figure 2.1). Pendant les trois années, le premier pic était de 5-10 % de taux de pourriture hebdomadaire, alors que le second pic avoisinait les 20 % de taux d'attaque. A certaines dates, il y a eu de fortes précipitations, à l'exemple de la semaine 42 en l'an 2000 où près de 400 millimètres d'eau sont tombés en quatre jours de pluie (figures 2.1 et 2.2).

Les températures moyennes sont restées relativement constantes le long de l'année, variant globalement de 19 à 22 °C. Les températures « sous-cacaoyères » ont toujours été nettement plus basses que les températures « ambiantes ».

A Goura, les courbes représentatives du taux de pourriture hebdomadaire sont également bimodales (figure 2.3), bien que ce soit moins marqué qu'à Mbankomo. L'incidence de la maladie a été très faible dans ce site pendant l'année 2001, avec des taux de pourriture hebdomadaire n'excédant pas 0.5 %. Dans ce site, les fortes précipitations sont rarement observées. Le cas de la semaine 24 de l'année 2000, où plus de 100 mm de pluies sont tombées en trois jours, est plutôt rare. Assez souvent, de fines pluies sont tombées pendant plusieurs jours et ont créé des conditions favorables à l'expression de la pourriture brune, car des pics de maladie ont été observés quelques jours après ce genre d'épisodes pluvieux. En 1999 par exemple, il y a eu 4 jours de pluies à chacune des semaines 32 et 33 (figure 2.4), pour une somme de pluies chaque fois inférieure à 25 mm d'eau. Pourtant à la semaine 34, un pic de la courbe de la maladie a été observé, le taux de pourriture passant de presque 0 % à sensiblement 1 % (figure 2.3, annexe 1). Le même phénomène a été observé pendant la campagne 2000, aux semaines 31 et 32 où en trois jours de pluies pendant chacune de ces semaines, il est tombé moins de 10 mm d'eau, avec pourtant comme conséquence une augmentation subite du taux de pourriture.



Figure 2.2 : EVOLUTION DES TEMPERATURES MOYENNES AMBIANTES ET SOUS CACAOYERE ET DU NOMBRE DE JOURS DE PLUIE PAR SEMAINE A MBANKOMO

Les températures ont également été relativement constantes le long des trois années, mais avec des moyennes supérieures à celles observées à Mbankomo.

A Barombi-Kang, la courbe du taux de pourriture hebdomadaire est unimodale (figure 2.5). Les taux de pourriture hebdomadaires sont comparables à ceux de Mbankomo, et considérablement plus élevés qu'à Goura. L'incidence de la maladie a été particulièrement forte en 2001, avec des taux hebdomadaires avoisinant les 40 %. Les pics de pourriture se sont globalement situés vers la semaine 36, bien qu'on ait observé des taux d'attaque assez élevés aux semaines 41 et 42 de la saison 1999. Les quantités de pluie tombées ont été très élevées. Pendant toute la période d'observation, il n'y a pas eu une seule semaine sans pluie (figure 2.6).

Les températures moyennes, constantes le long de l'année, sont intermédiaires entre celles observées à Mbankomo et à Goura.

Dans chacun des sites et chaque année, il y a toujours eu 1 à 4 °C de différence entre la température ambiante et celle sous-cacaoyère. Les différences les plus larges ont été observées à Mbankomo et à Goura.

Des analyses de variance des différentes variables climatiques, d'état sanitaire et de production ont été effectuées par site d'abord, de façon globale ensuite. Les résultats obtenus sont synthétisés dans les tableaux 2.3 et 2.4.

2.3.1.1. Analyse de variance des variables climatiques

Dans le tableau 2.3 sont présentées les moyennes des variables climatiques par site, pendant la période d'avril à fin novembre de chacune des trois années d'observation.

De façon générale, l'analyse de variance des diverses variables climatiques a montré des différences significatives entre les années dans chacun des sites. A Mbankomo et à Barombi-Kang, il a fait moins chaud pendant l'année 2001 que pendant les années 1999 et 2000. A Goura, c'est le phénomène inverse qui a été observé. L'année 2001 a été plus chaude que les deux précédentes.

Tableau 2.3 : Moyennes des variables climatiques mesurées en parcelles paysannes
(avril – novembre de chaque année)

Site	Année	Variables						
		TAmin	TAmay	TCmin	TCmax	TCmoy	Pluviométrie	
		(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)
Mbankomo	1999	19,44 <i>a</i>	22,10 <i>b</i>	20,77 <i>ab</i>	18,21 <i>a</i>	21,16 <i>a</i>	19,69 <i>a</i>	1762 <i>b</i>
	2000	19,24 <i>a</i>	23,78 <i>a</i>	21,51 <i>a</i>	18,54 <i>a</i>	20,95 <i>ab</i>	19,74 <i>a</i>	1823 <i>b</i>
	2001	18,35 <i>b</i>	21,67 <i>b</i>	20,01 <i>b</i>	17,29 <i>b</i>	20,23 <i>b</i>	18,77 <i>b</i>	2288 <i>a</i>
Goura	1999	21,16 <i>b</i>	31,93 <i>b</i>	26,54 <i>b</i>	20,08 <i>a</i>	28,25 <i>b</i>	24,16 <i>a</i>	1600 <i>a</i>
	2000	21,88 <i>ab</i>	31,86 <i>b</i>	26,87 <i>b</i>	20,03 <i>a</i>	30,24 <i>a</i>	25,14 <i>a</i>	1139 <i>b</i>
	2001	22,59 <i>a</i>	34,59 <i>a</i>	28,59 <i>a</i>	21,02 <i>a</i>	27,79 <i>b</i>	24,40 <i>a</i>	751 <i>c</i>
Barombi-Kang	1999	22,67 <i>a</i>	23,61 <i>a</i>	23,14 <i>a</i>	21,65 <i>a</i>	22,09 <i>a</i>	21,87 <i>a</i>	2003 <i>b</i>
	2000	22,49 <i>a</i>	23,54 <i>a</i>	23,02 <i>a</i>	20,64 <i>a</i>	22,51 <i>a</i>	21,56 <i>a</i>	1960 <i>b</i>
	2001	22,11 <i>a</i>	23,76 <i>a</i>	22,94 <i>a</i>	20,83 <i>a</i>	22,75 <i>a</i>	21,79 <i>a</i>	2873 <i>a</i>

Pour chaque variable à un site donné, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 5\%$

Tableau 2.4 : Moyennes des variables d'état sanitaire et de production en parcelles Paysannes par site.

Site	Année	Variables				
		Taux Wilt (%)	Taux Rongés (%)	Taux Autres Maladies (%)	Taux final pourriture (%)	Production réelle /arbre (nombre fruits)
Mbankomo	1999	73,82 b	5,08 a	3,39 b	44,26 c	10,62 a
	2000	77,25 a	1,75 c	4,10 a	59,43 b	7,71 b
	2001	77,30 a	2,61 b	0,69 c	64,76 a	11,14 a
Goura	1999	45,91 b	5,37 a	0,56 a	16,61 a	10,87 c
	2000	57,98 a	4,20 b	0,32 a	13,04 a	21,31 a
	2001	33,98 c	0,58 c	0,29 a	1,15 b	13,85 b
Barombi-Kang	1999	60,91 c	30,32 a	4,05 b	41,89 b	21,90 a
	2000	57,53 b	10,46 c	1,53 c	35,19 c	19,00 b
	2001	83,20 a	21,31 b	6,34 a	70,31 a	6,50 c

Pour chaque variable à un site donné, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 5\%$

Les quantités de pluies tombées dans ces sites pendant les périodes d'observation ont largement varié chaque année. A Mbankomo et à Barombi-Kang, il n'y a pas eu de différence significative de pluviométrie entre les années 1999 et 2000. En revanche, l'année 2001 a été très humide dans ces deux sites. A Goura les quantités de pluies tombées ont été significativement différentes pendant les trois années. Il a moyennement plu en 1999, un peu moins en 2000, et bien en deçà des normales en 2001.

L'analyse de variance globale effectuée ensuite, a montré une interaction site*année significative pour les variables *TAmin*, *Tamax*, *TAmoy*, *TCmin*, *TCmax* et *TCmoy* ($p < 5\%$), et hautement significative pour la variable *PLUVIO* ($p < 1\%$). La comparaison inter-site a donc été faite par année, révélant chaque fois une différence significative entre les sites.

Ainsi pendant chacune des années, Mbankomo a été le site où ont été relevées les températures les plus basses. Les températures de Goura et Barombi-Kang ont été assez proches les unes des autres, bien qu'on ait remarqué qu'il a fait bien plus chaud à Goura en 2001.

Barombi-Kang s'est révélé être le site où les précipitations sont le plus tombées pendant ces trois années d'observations, et Goura le site le moins arrosé, avec des quantités de pluies en deçà des normales en 2001.

Le fait assez marquant dans l'observation de ces variables climatiques, est cette différence de moyennes entre Mbankomo et Goura, deux localités pourtant situés dans la même zone agro-écologique.

2.3.1.2. Variables d'état sanitaire et de production

Le tableau 2.4 révèle des valeurs particulièrement élevées de la production réelle par arbre à Goura en 2000 (21,31 fruits mûrs par arbre) et à Barombi-Kang en 1999 (en moyenne 21,9 fruits / arbre) et en 2000 (19 fruits / par arbre). Ces chiffres sont de loin supérieurs à la moyenne de production nationale, qui est d'environ 10 fruits mûrs sains par arbre. C'est la preuve qu'il existe bel et bien un potentiel de production.

Ce tableau montre également un taux très élevé des fruits « wiltés » dans les différents sites. Le taux de fruits rongés est assez bas à Mbankomo et à Goura, et moyennement élevé à

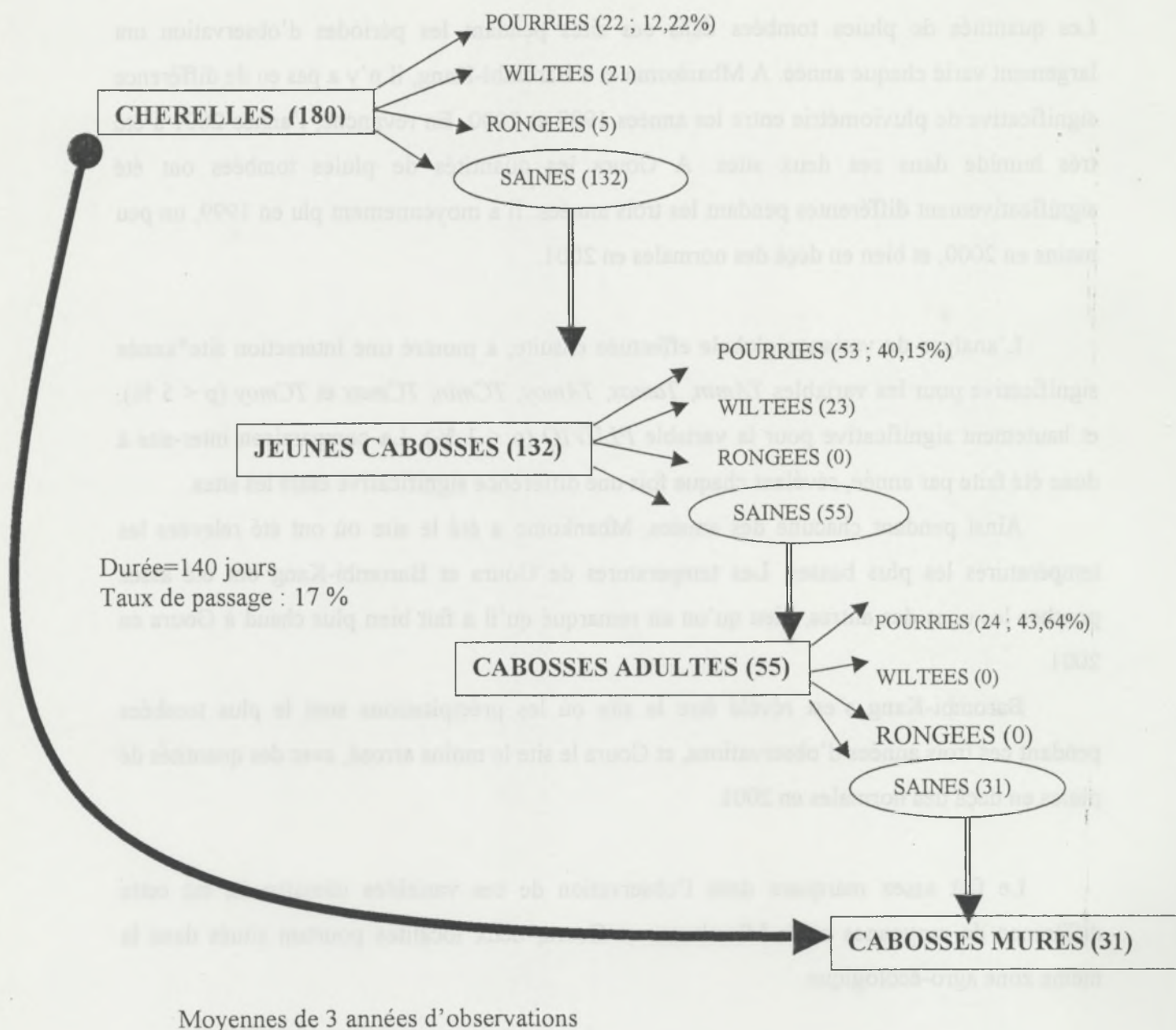


Figure 2.7 : Evolution du cycle de fructification en parcelle paysanne (Mbankomo)

Barombi-Kang, certainement du fait de la proximité de la broussaille. Très peu de fruits sont atteints par d'autres maladies, preuve que la pourriture brune est la principale maladie présente dans les parcelles paysannes au Cameroun. L'analyse a donc été focalisée sur le taux final de pourriture brune des cabosses.

La figure 2.7 résume les observations faites individuellement sur les fruits à Mbankomo. Il faut environ 140 jours pour que les fruits passent du stade « chérelle » à la maturité. En prenant en considération la quinzaine de jours qui s'écoulent entre la nouaison et le stade « chérelles » (jeunes fruits d'environ 4 cm de longueur), nous en déduisons que le cycle de fructification dans ce site est de 155 jours environ. Le taux de passage du stade « chérelle » au stade « mûr » est relativement faible, environ une chérelle seulement sur cinq ayant la chance d'atteindre la maturité.

Cette figure montre également que les chérelles et les jeunes cabosses sont les plus atteintes par le phénomène de « wilt » et qu'il n'y a pratiquement pas eu de fruits rongés dans notre échantillon.

Cette figure montre enfin que, contrairement à ce qu'on aurait pu attendre, les stades de développement les plus sensibles sont ceux de « jeune cabosse » et « cabosse adulte », et non celui de « chérelle ».

2.3.2. Expériences en laboratoire

Les résultats des expérimentations faites au laboratoire sont résumés dans les figures 2.8 et 2.9.

La figure 2.8 montre qu'il n'y a pas de différence significative ($p < 5\%$) entre la durée d'humectation des stades « jeune cabosse » (78 minutes en moyenne) et « cabosse adulte » (87 minutes). En revanche, il existe une différence significative de durée d'humectation entre le stade « chérelle » (52 minutes) et les deux autres stades de développement.

Sur la figure 2.9, on constate que quand tous les fruits sont ensemble, le stade de développement le plus sensible est celui de « chérelle » (note 7,4 sur l'échelle d'Iwaro [1987b]). Il n'y a pas de différence significative ($p < 5\%$) entre les stades « jeune cabosse » (note 5,3) et « cabosse adulte » (note 5).

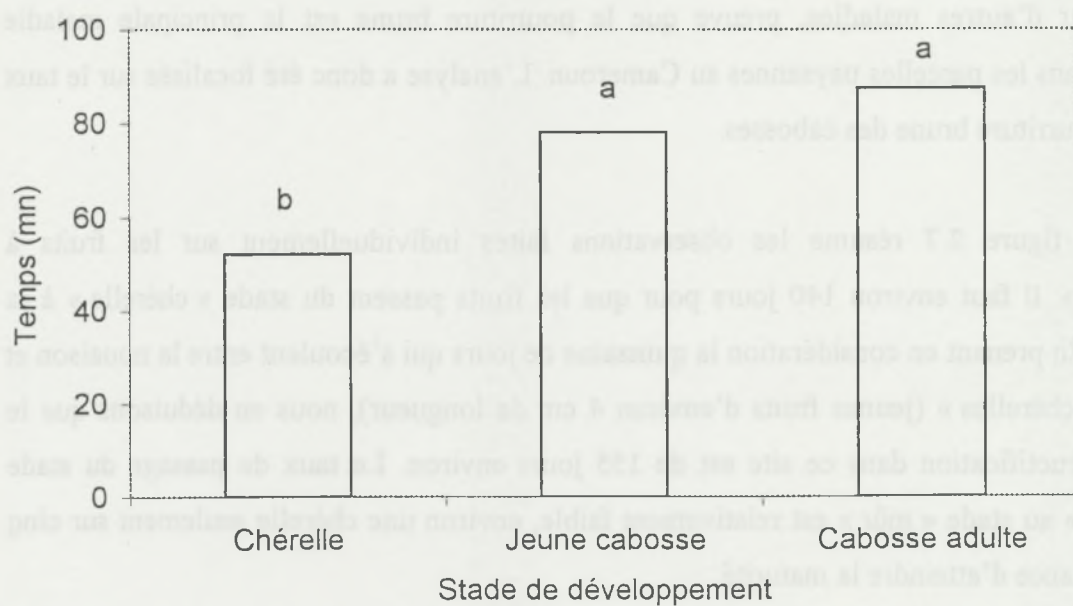


Figure 2.8 : Durée d'humectation des fruits

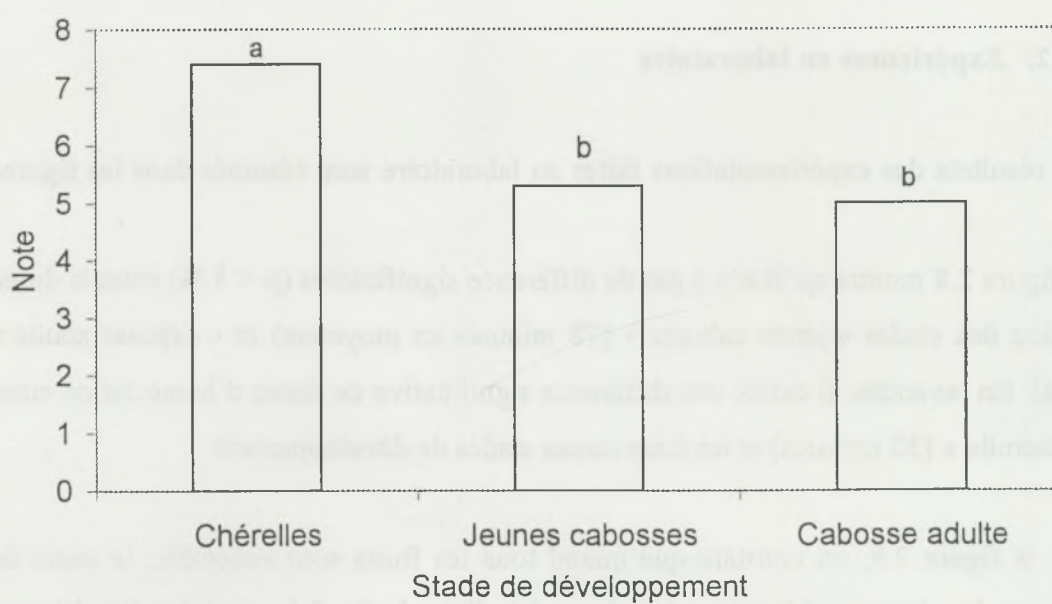


Figure 2.9 : Echelle de sensibilité des fruits

Les observations du test de sensibilité sont différentes de celles auxquelles on se serait attendu au vu des résultats du test sur la durée d'humectation. Ces résultats s'expliqueraient par le fait que dans le protocole expérimental, les bacs d'inoculation ont été couverts, les conditions d'aération ne reflétant plus celles observées au champ.

2.3.3. Autocorrélations temporelles et corrélations croisées

Les autocorrélations des variables ont été estimées, dans le but de comprendre l'évolution de la maladie au cours du temps.

Le logiciel SAS (2001) fournit les résultats des fonctions d'autocorrélation simple et partielle, avec les corrélogrammes respectifs. Les bornes des intervalles de confiance sont symbolisées par des points. Chaque terme qui sort de cet intervalle est donc significativement différent de 0 au seuil de 5 %. Les corrélogrammes du taux de pourriture (*TPOUR*) et de la pluviométrie (*PLUVIO*) dans les trois sites pendant les trois années sont représentés dans les figures 2.10 à 2.15.

D'après les figures 2.10 à 2.12 (autocorrélations de la pluviométrie), tous les termes du corrélogramme appartiennent à l'intervalle de confiance. Cela est caractéristique d'un processus de *bruit blanc*. La statistique Q de Ljung-Box (1978) confirme ce fait. La probabilité critique de ce test a été dans tous les cas, supérieure à 0,05, ce qui nous amène à accepter l'hypothèse H_0 de nullité des coefficients ρ_k .

En revanche l'observation des figures 2.13 à 2.15 (autocorrélations du taux de pourriture) montre que chacun des corrélogrammes a son premier ou son second termes (décalage 1 ou 2) différent de zéro. Il existe apparemment une influence de y_{t-1} ou y_{t-2} sur y_t . Il apparaît également que les valeurs diminuent de façon progressive. Ce sont des cas typiques de corrélogrammes affectés d'une tendance (Bourbonnais, 2000). Le test Q de Ljung-Box a, dans les différents cas, une probabilité critique proche de 0. Nous avons ainsi un risque nul de rejeter à tort l'hypothèse de nullité des coefficients ρ_k . Il apparaît bien que la série n'est pas un processus de *bruit blanc*.

Nous pouvons également constater la moyenne particulièrement faible de la série à Goura en 2001 (0,083), alors que cette même année, la moyenne de la série a été très élevée à

----- 1999 -----																									
Autocorrelations																									
Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error	
0	4918.516	1.00000													*****										0
1	382.126	0.07769								.					**		.								0.182574
2	187.546	0.03813								.					*		.								0.183673
3	1366.239	0.27777								.					*****		.								0.183937
4	926.344	0.18834								.					****		.								0.197425
5	-399.037	-.08113								.			**				.								0.203326
6	-252.147	-.05126								.			*				.								0.204402
7	345.491	0.07024								.			.		*		.								0.204830

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 57.63333; Ecart-type: 70.13213; Nombre d'observations : 30
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.5880)

----- 2000 -----																									
Autocorrelations																									
Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error	
0	17337.896	1.00000													*****										0
1	-583.275	-.03364									*														0.182574
2	-2156.423	-.12438									**														0.182781
3	-2948.285	-.17005									***														0.185580
4	5410.629	0.31207												*****											0.190704
5	3870.390	0.22323												****											0.207027
6	-2549.700	-.14706									***														0.214901
7	-2625.913	-.15146									***														0.218230

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 107; Ecart-type: 131.6734; Nombre d'observations : 30
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.2403)

----- site=4 annee=2001 -----																									
Autocorrelations																									
Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error	
0	5352.929	1.00000													*****										0
1	1800.354	0.33633													*****										0.182574
2	1102.819	0.20602													****										0.202175
3	362.601	0.06774													*										0.209056
4	537.916	0.10049													**										0.209786
5	192.154	0.03590													*										0.211384
6	-527.323	-.09851																							0.211587
7	-1024.986	-.19148													****										0.213111

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 78.05967; Ecart-type: 73.16371; Nombre d'observations : 30
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.4040)

Figure 2.10: Corrélogrammes de la pluviométrie à Mbankomo (1999 - 2001)

----- 1999 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	21.186559	1.00000												*****										0
1	8.088478	0.38177												*****										0.182574
2	8.377022	0.39539												*****										0.207485
3	10.395614	0.49067												*****										0.231241
4	5.272580	0.24886												*****										0.263672
5	3.490511	0.16475												***										0.271389
6	3.871552	0.18274												***										0.274702
7	1.113415	0.05255												*										0.278725

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 4.346205; Ecart-type: 4.602886; Nombre d'observations : 30
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.0007)

----- 2000 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	38.578025	1.00000												*****										0
1	31.554479	0.81794												*****										0.182574
2	26.579977	0.68899												*****										0.279168
3	19.845831	0.51443												*****										0.331032
4	13.549422	0.35122												*****										0.356686
5	6.927729	0.17958												****										0.368034
6	-0.853193	-0.02212																						0.370943
7	-3.786381	-0.09815										**												0.370987

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 5.293874; Ecart-type: 6.211121; Nombre d'observations : 30
Bruit aléatoire (Probabilité critique : < 0.0001)

----- 2001 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	23.820941	1.00000												*****										0
1	16.658325	0.69931												*****										0.182574
2	7.924380	0.33266												*****										0.256780
3	3.460319	0.14526												***										0.270765
4	-1.901597	-0.07983										**												0.273351
5	-7.038713	-0.29548									*****													0.274127
6	-8.581949	-0.36027								*****														0.284545
7	-6.066665	-0.25468								*****														0.299364

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 5.387807 ; Ecart-type: 4.88067 ; Nombre d'observations : 30
Bruit aléatoire (Probabilité critique : < 0.0001)

Figure 2.13 : Corrélogrammes du taux de pourriture à Mbankomo (1999 - 2001)

----- 1999 -----																								
Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	
-7	16.298205	0.05049											*											
-6	42.290031	0.13101											***											
-5	32.304875	0.10007											**											
-4	51.641667	0.15998											***											
-3	119.387	0.36984											*****											
-2	56.254343	0.17426											***											
-1	105.655	0.32730											*****											
0	140.246	0.43445											*****											
1	222.071	0.68793											*****											
2	137.707	0.42659											*****											
3	51.760946	0.16034											***											
4	34.636811	0.10730											**											
5	-27.208850	-.08429										**												
6	63.493589	0.19669											****											
7	-17.263286	-.05348										*												

"." symbolise 2 erreurs types

----- 2000 -----																								
Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	
-7	-55.763507	-.06818											*											
-6	17.361483	0.02123																						
-5	44.280411	0.05414											*											
-4	155.228	0.18980											****											
-3	119.396	0.14599											***											
-2	167.955	0.20536											****											
-1	230.839	0.28225											*****											
0	350.626	0.42872											*****											
1	371.412	0.45414											*****											
2	282.154	0.34500											*****											
3	72.824735	0.08905											**											
4	142.497	0.17424											***											
5	72.370567	0.08849											**											
6	-63.500121	-.07764										**												
7	-114.197	-.13963										***												

"." symbolise 2 erreurs types

----- 2001 -----																								
Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	
-7	-118.958	-.33313											*****											
-6	-120.912	-.33860											*****											
-5	-95.241579	-.26672											*****											
-4	-48.299637	-.13526											***											
-3	4.593923	0.01286																						
-2	-5.527085	-.01548																						
-1	49.168097	0.13769											***											
0	83.125548	0.23279											*****											
1	110.980	0.31079											*****											
2	137.117	0.38399											*****											
3	68.844737	0.19279											****											
4	31.573277	0.08842											**											
5	-30.891565	-.08651										**												
6	-63.692703	-.17837										****												
7	-99.497569	-.27864										*****												

"." symbolise 2 erreurs types

Figure 2.16: Corrélations croisées Taux de pourriture - Pluviométrie à Mbankomo

Barombi-Kang (8,023). En effet à Goura en 2001, les quantités de pluies ont été très faibles par rapport aux autres sites et le taux de pourriture final a pratiquement été nul.

Les figures 2.16 à 2.18 représentent les corrélations croisées entre le taux de pourriture et la pluviométrie. Ce n'est pas une relation univoque qui est établie entre ces deux variables. Quand il pleut, la maladie ne s'exprime pas immédiatement. De façon globale, les corrélations significatives les plus élevées sont obtenues à des décalages d'une à deux semaines.

Les résultats de corrélations croisées de l'année 2001 à Goura n'ont pas été représentés, compte tenu du faible taux de pourriture brune dans la parcelle pendant cette saison.

2.3.4. Régression multiple

Plusieurs sous-ensembles de données climatiques ont été testés pour trouver l'équation permettant une meilleure prévision du taux de pourriture (*TPOUR*), notamment le sous-ensemble constitué des variables *PLUVIO*, *TAmin*, *TAmay*, *TCmin*, et *TCmax* d'une part, puis le sous-ensemble contenant les variables *PLUVIO*, *TA moy*, *TC moy* et *Amp* (Amplitude) d'autre part. Ces variables climatiques sont introduites dans les modèles avec un décalage de deux semaines par rapport au taux de pourriture, en fonction de ce qui a été indiqué dans l'étude des corrélations croisées. Diverses méthodes de régression multiple ont été utilisées, notamment la sélection ascendante (*forward selection*), l'élimination descendante (*backward elimination*), et la régression progressive ou pas-à-pas (*stepwise regression*) (Draper et Smith, 1981). Les résultats les plus satisfaisants en termes de mesure globale de l'ajustement (R^2) ont été obtenus avec la méthode de régression pas-à-pas. De tous les facteurs climatiques étudiés, seule la variable *PLUVIO* a pu rentrer dans les différents modèles.

Le tableau 2.5 présente les résultats des régressions entre le taux de pourriture et la pluviométrie par site et par année, puis par site pour les données cumulées des trois années. A Goura, seules les données des années 1999 et 2000 ont été cumulées, le taux de pourriture global ayant été presque nul en 2001.

Ces résultats montrent que dans chacun des cas, l'incidence de la maladie est expliquée de façon hautement significative par la pluviométrie. Mais les coefficients de détermination

Tableau 2.5 : Résultats de l'analyse de régression entre Taux de pourriture et Pluviométrie.

Site	Année	Equation du modèle*	R ²	Probabilité critique
Mbankomo	1999	$y = 0.168 \text{ PLUVIO}$	53 %	< 0.001
	2000	$y = 0.096 \text{ PLUVIO}$	56 %	< 0.001
	2001	$y = 0.146 \text{ PLUVIO}$	61%	< 0.001
	1999 - 2001	$y = 0.120 \text{ PLUVIO}$	69 %	< 0.001
Goura	1999	$y = 0.150 \text{ PLUVIO}$	62 %	< 0.001
	2000	$y = 0.167 \text{ PLUVIO}$	57 %	< 0.001
	1999 - 2001	$y = 0.146 \text{ PLUVIO}$	74 %	< 0.001
Barombi-Kang	1999	$y = 0.429 \text{ PLUVIO}$	68 %	< 0.001
	2000	$y = 0.210 \text{ PLUVIO}$	54 %	< 0.001
	2001	$y = 0.223 \text{ PLUVIO}$	58 %	< 0.001
	1999 - 2001	$y = 0.257 \text{ PLUVIO}$	81 %	< 0.001

* $y = \arcsinus \sqrt{TPOUR}$

Tableau 2.6 : Quantité de pluie nécessaire (mm) pour engendrer un taux de pourriture hebdomadaire de 1 % selon les années dans les différents sites (Estimations basées sur les équations du tableau 2.5)

Sites	année			
	1999	2000	2001	1999-2001
Mbankomo	34,2	59,8	39,3	47,8
Goura	38,3	34,4	-	39,3
Barombi-Kang	13,8	27,3	25,7	22,3

(R^2), qui représentent le pourcentage de variabilité expliquée par le modèle, ont été relativement bas pour les analyses faites par année et par site. Ils ont été améliorés quand les données des différentes années ont été combinées par site, mais pas assez, excepté à Barombi-Kang où la barre des 80 % a été franchie.

Dans chacun des sites, les modèles ajustés ont été assez variables d'une année à l'autre, tant en termes de coefficient de détermination que de coefficient de régression. Il en résulte des valeurs très variées quand il s'agit de prévoir la quantité théorique de pluies nécessaire pour atteindre un taux de pourriture donné dans une cacaoyère (tableau 2.6). Globalement, on constate néanmoins que pour atteindre un taux de pourriture hebdomadaire de 1 %, il faut plus d'eau à Mbankomo (48 mm) qu'à Goura (39 mm) et bien plus encore qu'à Barombi-Kang (22 mm).

2.4 Discussion

Lors de cette étude, les moyennes des variables climatiques, d'état sanitaire et de production ont de façon globale, montré de grandes variations entre les années d'observation au sein d'un même site. Les résultats obtenus s'accordent néanmoins avec ceux couramment observés dans ces différentes régions, hormis le cas atypique des données de Goura en 2001. Les sites retenus sont donc bien représentatifs des zones agro-écologiques concernées.

Les observations faites au champ ont montré que les fruits étaient plus sensibles à la pourriture brune aux stades de développement « jeune cabosse » et « cabosse adulte » qu'à celui de « chérelle », alors qu'on aurait pu penser que les chérelles seraient les plus vulnérables, du fait de la fragilité de leur cortex. Ces résultats peuvent s'expliquer par la structure de l'épiderme des fruits à ces différents stades de développement. Tarjot (1972) a en effet montré que les chérelles ont bien plus de poils épidermiques ($62/\text{mm}^2$) par unité de surface que n'en ont les cabosses moyennes ($31/\text{mm}^2$) et adultes ($16/\text{mm}^2$). De plus ces chérelles ont presque autant de stomates ($22/\text{mm}^2$) que les cabosses moyennes ($24/\text{mm}^2$) et bien plus que les cabosses adultes ($12/\text{mm}^2$). Cette structure anatomique pourrait expliquer que les films d'eau contenant les éléments infectieux ont du mal à atteindre le cortex des chérelles, et le grand nombre de stomates par unité de surface faciliterait d'avantage l'aération. Le même phénomène a été observé dans le cas de la vigne. L'abondance des poils épidermiques (pubescence) chez certains cépages diminue la mouillabilité des feuilles

(Kortekamp *et al.*, 1999) et entrave le déroulement du processus infectieux chez le mildiou (*Plasmopara viticola*) (Kortekamp et Zyprian, 1999).

Ces hypothèses sont vérifiées par les résultats obtenus au laboratoire, montrant que la durée d'humectation des fruits est significativement plus basse au stade « chérelle » qu'aux stades « jeune cabosse » et « adulte ». Il serait toutefois nécessaire que ces expérimentations soient faites à nouveau de façon plus précise dans des chambres de rosée avec des capteurs, pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus (Huber et Gillespire, 1992).

Pour étudier les relations entre la pourriture brune et les facteurs climatiques, deux types d'analyses ont été faites : l'analyse des corrélations croisées et l'analyse de régression multiple.

Les résultats d'analyse de corrélations croisées ont montré que la relation taux de pourriture – pluviométrie n'était pas univoque. Il y a toujours eu un décalage d'une à deux semaines entre la chute des pluies et l'expression de la maladie. Ces résultats peuvent s'expliquer par la latence, c'est-à-dire la période qui sépare la contamination des fruits de l'apparition des premiers symptômes de pourriture brune. Dans le cas de la pourriture due à *Phytophthora megakarya* chez le cacaoyer, cette période est de 6 jours. Les observations ayant été faites un jour précis par semaine, il peut s'avérer que la contamination des fruits ait eu lieu après le passage des observateurs, d'où les décalages d'une à deux semaines constatées entre les épisodes pluvieux et l'expression de la maladie.

Dans les analyses de régression multiple, la pluviométrie s'est révélée être le meilleur indicateur permettant de prévoir la maladie. Dans les différents sites, les variations des températures moyennes, relativement constantes le long de l'année, ne semblent pas intervenir dans le développement de l'épidémie. En effet, Brasier et Griffin (1979) ont montré en laboratoire que les températures optimum de croissance de *P. megakarya* sont de 24 à 26 °C, les minima se situant à 10-11 °C et les maxima à 29-30 °C. En présence des fruits sur les arbres donc, il faut simplement une quantité de pluie suffisante pour assurer la dispersion de l'inoculum et générer une humidité relative permettant de déclencher la maladie.

Cette étude a également montré qu'il ne fallait pas forcément de très intenses pluies pour déclencher la maladie. Des pluies de faible intensité tombées pendant plusieurs jours peuvent tout aussi bien créer des conditions favorables au développement de l'épidémie.

Un des objectifs à terme de cette étude est de pouvoir contribuer à l'élaboration des modèles d'avertissements agricoles en faisant des prévisions, c'est-à-dire en déterminant les valeurs que la variable de la série chronologique (taux de pourriture) devraient prendre dans le futur. Des modèles empiriques ont été ajustés aux données expérimentales. Ces modèles sont trop variables d'une année à l'autre pour qu'il soit possible, au stade actuel de l'étude, de proposer un modèle simplifié par site. Des années d'observations complémentaires sont nécessaires, de même qu'un travail d'analyse plus approfondie des séries temporelles.

CHAPITRE 3 : DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DES EPIDEMIES DUES A *Phytophthora megakarya*

3.1. Introduction

Les changements chronologiques des configurations spatiales d'une épidémie reflètent la répartition de l'inoculum primaire, les processus de dispersion, d'infection et de production de l'inoculum secondaire, et sont les résultats de l'interaction entre les facteurs physiques, biologiques et environnementaux (Larkin *et al.*, 1995). Un certain nombre de questions se posent encore en cacaoculture quant à la dynamique spatio-temporelle de la pourriture brune des cabosses due à *Phytophthora megakarya*, questions dont les réponses contribueraient notamment à améliorer les stratégies de lutte contre cette maladie. Cette dynamique doit être abordée à plusieurs échelles de signification épidémiologique différente. Nous présenterons ici des échelles par ordre croissant : cabosse, arbre et parcelle. La dynamique inter-parcellaire voire régionale ne sera pas abordée dans le cadre de ce travail.

La pourriture brune des fruits se caractérise par l'apparition sur le cortex d'une petite tache d'abord translucide, qui brunit ensuite et se développe plus ou moins rapidement (cf. section 1.3.1). La position des lésions sur les cabosses attaquées par *Phytophthora spp* a préoccupé certains chercheurs. Au Ghana (Dade, 1926), au Nigéria (Opeke et Gorenz, 1974), au Brésil (Medeiros, 1976), aux Iles Salomon (Jackson et Newhook, 1978) et en Côte d'Ivoire (Babacauh, 1983b), les différentes observations font apparaître des situations variables selon les pays et l'âge du fruit. Au Cameroun, aucune étude n'a été menée jusqu'à présent pour caractériser la répartition des lésions sur le cortex des fruits attaqués par la pourriture brune. Le sujet n'est pas seulement académique, mais peut avoir des conséquences pratiques en ce qui concerne les traitements fongicides dont l'homogénéité de couverture des cabosses est rarement vérifiée.

L'inoculum primaire, à l'origine de l'épidémie, est constitué des structures de l'agent pathogène conservées pendant les saisons sèches. La diversité des types d'entités infectieuses (sporocystes, zoospores, chlamydospores, hyphes) et le fait qu'elles peuvent être libres ou abritées par des particules de terre ou des fragments d'organes malades, autorisent de multiples modes de dissémination par l'eau, les insectes, les rongeurs, l'homme, ou le vent

(Thorold, 1975 ; Babacauh, 1983b). Les lieux de conservation ne sont pas connus avec certitude. Certains auteurs citent le sol comme lieu de conservation prépondérant du parasite, alors que d'autres citent différents organes de l'arbre tels que l'écorce, les cabosses momifiées et les coussinets floraux (Babacauh, 1980). Même si l'ensemble de ces sites semble être aujourd'hui des lieux de conservation possibles (Okaisabor, 1969 ; Gregory, 1974), aucune indication concernant la répartition de l'inoculum primaire du *Phytophthora megakarya* entre ces différents sites n'a encore été proposée sur la base d'observations ou d'expérimentations. La caractérisation de l'inoculum primaire et de sa propagation au sein d'un arbre est nécessaire pour la compréhension globale du processus épidémique et orientera la définition des méthodes de lutte.

Au sein des cacaoyères, le développement spatio-temporel des épidémies dues à *P. megakarya* n'est pas encore bien connu. L'objectif principal de la présente étude est donc d'évaluer la présence ou l'absence de foyers primaires au sein des parcelles. La présence de tels foyers au sein de la plantation pourrait avoir des conséquences importantes sur les stratégies d'application des produits phytosanitaires.

L'objectif de ce chapitre est donc d'apporter des éléments de réponse aux questions d'épidémiologie qui se posent : Quelle est la répartition des symptômes de la pourriture brune à l'échelle du fruit ? Quelle est la répartition verticale des fruits malades à l'échelle de l'arbre ? Quelle est la distribution spatio-temporelle de l'incidence de la maladie à l'échelle d'une parcelle ?

L'étude a porté sur des observations de symptômes de la maladie sur les fruits dans trois parcelles paysannes situées dans différentes zones agro-écologiques du bassin de production du cacaoyer au Cameroun. Pour préciser le niveau d'agrégation des arbres portant des fruits malades, des techniques de géostatistique, permettant de mettre en évidence une structure spatiale (c'est-à-dire des corrélations entre valeurs situées en des points différents du réseau), ont été utilisées avec des données collectées pendant trois années consécutives.

3.2. Matériel et méthodes

3.2.1. Description des parcelles expérimentales

Les travaux ont été réalisés en parcelles paysannes à Mbankomo, Goura et Barombi-Kang (figure 1), sites décrits dans le paragraphe 2.2.

Le dispositif expérimental est constitué de 100 arbres disposés en un bloc contigu (annexe 3.1). Ce bloc est entouré d'une ceinture de deux lignes de cacaoyers, qui sont traités intensément à l'aide de fongicides de contact (à base d'oxyde de cuivre) et pénétrant (à base de métalaxyl), assurant ainsi un cordon sanitaire par rapport à la parcelle paysanne adjacente. A Goura, le dispositif expérimental a été modifié en 2001, du fait de la chute d'un gros arbre ayant entraîné la destruction des cacaoyers initialement retenus.

Les arbres ont été compartimentés en trois niveaux : 0–0,5 m (niveau 1), 0,5–1,50 m (niveau 2) et > 1,50 m (niveau 3). Le compartimentage des arbres s'est fait dans le but de détecter la source d'inoculum primaire et de suivre la dynamique de la colonisation de la maladie sur l'arbre.

A Mbankomo, afin de suivre individuellement des fruits pour étudier la dynamique de la colonisation de la maladie dans l'arbre, 12 fruits ont été sélectionnés par arbre (4 par niveau) et ceci sur 15 arbres, soit un total de 180 fruits suivis à partir du stade 'chérelle'. Des étiquettes de bijoutier ont été utilisées pour marquer les fruits sélectionnés.

3.2.2. Variables mesurées en champ

Les fruits pourris (atteints de pourriture brune), les fruits wiltés (dessèchement précoce), les fruits endommagés par les rongeurs, les fruits atteints d'autres maladies que la pourriture brune, les chérelles (fruits ayant atteint 4 cm de longueur), les jeunes cabosses (fruits ayant dépassé le stade de chérelle, mais n'ayant pas atteint la taille adulte), les cabosses adultes (fruits ayant atteint la taille adulte mais pas la maturité), et les cabosses mûres saines ont été comptés de façon hebdomadaire. Dans chaque parcelle, le flux d'apparition des chérelles a été évalué sur 25 arbres pris au hasard. Les chérelles comptées ont ensuite été

marquées avec des étiquettes de bijoutier, pour ne pas être recomptées au passage suivant. Ces décomptes n'ont été fait qu'aux niveaux 1 et 2, les observateurs ayant des difficultés à atteindre les fruits du niveau 3 pour y accrocher des étiquettes.

Sur les 180 fruits observés individuellement à Mbankomo, étaient notés l'état sanitaire (*sain*, *pourri*, « *wilté* », *rongé*) du fruit, ainsi que la date et le lieu d'apparition des premiers symptômes de pourriture brune sur le fruit.

Chaque année, les observations ont commencé dès l'apparition des premiers fruits (fin avril-début mai), et se sont poursuivies jusqu'à la fin de la campagne (fin novembre – décembre). Il y a donc eu une trentaine de semaines d'observations par site. Après chaque comptage, les fruits malades étaient prélevés des arbres et mis hors de la parcelle.

3.2.3. Analyses statistiques

Le nombre total de cabosses (*TOTCAB*) et le taux de pourriture cumulé (*TPC*) sont les variables dérivées de celles mesurées en champ.

A une semaine donnée, *TOTCAB* représente la somme des fruits présents sur l'arbre excepté les chérelles, les cabosses *wiltées*, rongées ou atteintes d'autres maladies que la pourriture brune.

Le taux de pourriture cumulé, calculé sur la base du nombre total de cabosses (hors 'wiltées', 'rongées', et 'autres maladies') produites pendant la campagne est exprimé par la formule suivante (Berry et Cilas, 1994b ; De Jesus, 1992) :

$$TPC_i = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} POU_i * 100}{JC_N + CA_N + \sum_{i=1}^{i=N} (POU_i + MS_i)} \quad (3.1)$$

où *n* représente le numéro de la semaine de calcul, *N* le nombre total de semaines d'observations, *POU_i* le nombre de fruits pourris à la semaine *i*, *JC_N* le nombre de jeunes

cabosses à la dernière semaine d'observations, CA_N le nombre de cabosses adultes à la dernière semaine d'observations et MS_i le nombre de fruits mûrs à la semaine i .

A l'échelle du fruit, le test du Khi-deux et l'analyse de variance (après transformation angulaire en $\text{Arcsinus} \sqrt{\text{pourcentage}}$) ont été utilisés pour vérifier respectivement l'hypothèse de dépendance entre le stade de développement du fruit et la position des lésions, puis l'hypothèse d'égalité des moyennes des proportions de lésions des différentes zones.

A l'échelle de l'arbre, pour comparer la contribution en pourcentage du nombre de fruits atteints par la pourriture par hauteur par rapport au nombre total de fruits malades à différentes semaines, les graphiques en histogrammes empilés ont été utilisés.

A l'échelle de la parcelle, la dynamique temporelle de la maladie a été représentée par des courbes. Ensuite, des cartes de la répartition spatiale de l'incidence de la maladie et du nombre total de cabosses par arbre (production potentielle) ont été réalisées. Le découpage en classes a été effectué suivant la méthode des quartiles (Rémond, 1996), les quartiles étant les mesures de position d'une distribution qui divisent un ensemble d'observations en quatre parties égales en effectif (25 % chacune). Enfin, pour étudier la structure et les corrélations spatiales pouvant exister entre les arbres portant des fruits malades, des analyses géostatistiques et d'autocorrélation ont été effectuées.

3.2.3.1. Définition et choix de la taille des voisinages

Le voisinage d'un arbre donné peut être défini de plusieurs manières (Reynolds et Madden, 1988 ; Rémond, 1996) :

- par l'ensemble des points ou objets éloignés d'une distance inférieure à une valeur donnée. La distance choisie est en général euclidienne.
- par l'ensemble des objets ayant au moins une frontière commune

La disposition des arbres dans la parcelle permet d'étudier plusieurs ordres de voisinage :

.	<i>b</i>	.	<i>x</i> : arbre étudié
<i>d</i>	<i>a</i>	<i>d</i>	<i>a</i> : plus proche voisin sur la ligne
<i>c</i>	<i>x</i>	<i>c</i>	<i>b</i> : deuxième plus proche voisin sur la ligne
<i>d</i>	<i>a</i>	<i>d</i>	<i>c</i> : plus proche voisin sur la colonne
.	<i>b</i>	.	<i>d</i> : deuxième plus proche voisin sur la colonne

Au Cameroun, l'espacement dans une cacaoyère est théoriquement le même entre les lignes et les colonnes (les écartements varient de 2,5 x 2,5 m à 3 x 3 m). Les voisins *a* et *c* ne sont donc pas différents en terme de distance. Par contre, l'espacement entre *x* et *b* est le double de celui entre *x* et *c* ; les voisins *b* et *c* sont donc différents en terme de distance. L'espacement entre *x* et *a* est inférieur à celui entre *x* et *d* ; les voisins *a* et *d* sont donc également différents en terme de distance. Les branches des arbres de deux lignes ou deux colonnes consécutives se touchent généralement, facilitant ainsi le passage de l'agent pathogène.

On a donc trois catégories de voisins qu'il est possible de prendre en compte : les plus proches voisins en ligne ou en colonne (*a* et *c*), les seconds plus proches voisins en ligne ou en colonne (*b*) et les plus proches voisins en diagonale (*d*). Ces dispositions ne sont pas souvent strictement observées dans les cacaoyères. En effet, les systèmes de plantation des cacaoyers ne sont pas toujours réguliers, soit en raison de l'irrégularité du terrain, soit du fait du non-remplacement systématique des arbres morts.

Par souci de simplicité, pour le choix de la taille, c'est-à-dire de la structure de la matrice d'autocorrélation, nous avons choisi de travailler avec les plus proches voisins en ligne ou en colonne (*a* et *c*).

3.2.3.2. Le langage de la géostatistique

Pour étudier l'existence des composantes spatiales dans les parcelles, les techniques d'analyses géostatistiques ont été utilisées.

En statistique classique, on ne prend en compte, dans les calculs d'estimations et d'erreurs, que les informations propres au domaine à estimer, indépendamment de ce qui

l'entoure. Ceci n'est pas toujours satisfaisant, car il est des situations où l'information sur l'entourage ne peut être ignorée.

La géostatistique étudie les problèmes posés par les *variables régionalisées* (Maréchal, 1975). Une variable est dite *régionalisée* lorsque les valeurs qu'elle prend dépendent de sa position dans l'espace (Lecoustre et de Reffye, 1986). Inspirée par la recherche minière, la théorie des variables régionalisées a été mise au point par Matheron (1970), et appliquée depuis dans de nombreux domaines, dont celui de l'épidémiologie (Chellemi et *al.* 1988 ; Lannou et Savary, 1991 ; Chadoeuf *et al.*, 1992 ; Van de Lande, 1993 ; Nelson et *al.*, 1999 ; Van de Lande et Zadoks, 1999 ; Ristaino et Johnston, 1999 ; Ristaino et Gompertz, 2000 ; Savary et *al.*, 2001). En pratique, l'outil de base de la géostatistique est le *semi-variogramme*, qui est la courbe représentative de la variation de la *semi-variance* en fonction de la distance entre les points des couples considérés (Matheron, 1963 ; Cressie, 1985, 1991 ; Trangmar et *al.*, 1985 ; Isaaks & Srivastava, 1989).

Soit $F(x)$ une observation en un point x d'un espace à deux dimensions, et $F(x+h)$ l'observation en un point distant de h du point x . La *semi-variance*, $G(h)$ est définie pour toute distance h , comme étant la moyenne des carrés des écarts des valeurs prises par la variable en tous points distants de h l'un de l'autre (Lecoustre et de Reffye, 1986). Pour toute distance h , $G(h)$ est définie par l'équation (3.2) suivante :

$$G(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{i=N_h} [F(x_i+h) - F(x_i)]^2 \quad (3.2)$$

où N_h est le nombre de couples $(x_i, x_i + h)$, x_i est la position d'un élément du couple et $x_i + h$ la position de l'autre élément séparé de h unités.

Cette fonction mesure la variabilité qui existe en moyenne entre les points distants de h . $G(h)$ étant la *semi-variance*, on appelle tout simplement *variance* l'expression $2G(h)$ dont dérive le *variogramme*.

Assez souvent, au fur et à mesure que la distance h croît, $G(h)$ tend vers une valeur constante. Si on arrive à ce seuil, appelé palier (*sill* en anglais), on définit la portée (*range*), notée α , comme la distance à laquelle ce palier est atteint (figure 3.1). C_I désigne la constante

de palier. La portée a renseigne sur l'extension de la zone d'influence d'un point expérimental. Les points séparés par des distances plus petites que la portée sont considérés comme spatialement corrélés, alors que ceux séparés par des distances plus grandes ne le sont pas. L'ordonnée à l'origine, la valeur de la *semi-variance* à la distance $h = 0$, désigne ce qu'on appelle l'« effet pépité » (*nugget effect*), C_0 . Le comportement du *semi-variogramme* à l'origine traduit la régularité de la variable régionalisée : allure parabolique, allure linéaire, discontinuité à l'origine (Freycon et Sebastien, 1991).

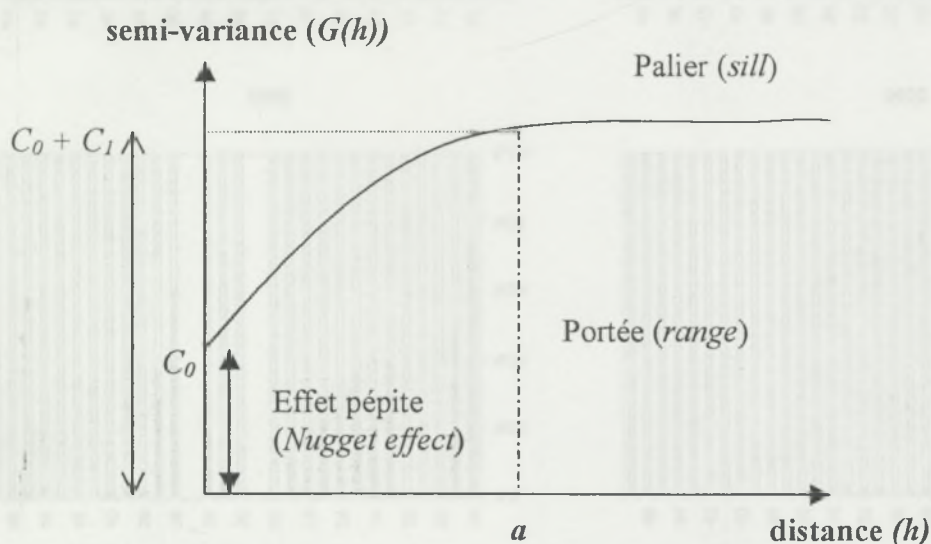


Figure 3.1 : Allure générale d'un *semi-variogramme*

L'incidence de la maladie a été considérée dans ce chapitre comme une variable régionalisée, $F(x_i)$ étant l'incidence de la maladie sur l'arbre x_i , et $F(x_i + h)$ l'incidence de la maladie d'un autre arbre situé à une distance h .

3.2.3.3. Autocorrélations spatiales

Pour évaluer le degré d'autocorrélation spatiale entre les arbres voisins portant des fruits malades, le test I de Moran a été utilisé. Ce test a été préféré au test du 'Nombre de liens' (plus indiqué pour les données binaires) parce que les variables étudiées ($TOTCAB$, le nombre total de cabosses et TPC , le taux de pourriture cumulé) étaient continues (Moran, 1950 ; Cliff et Ord, 1981 ; Ristaino et Gumpertz, 2000).

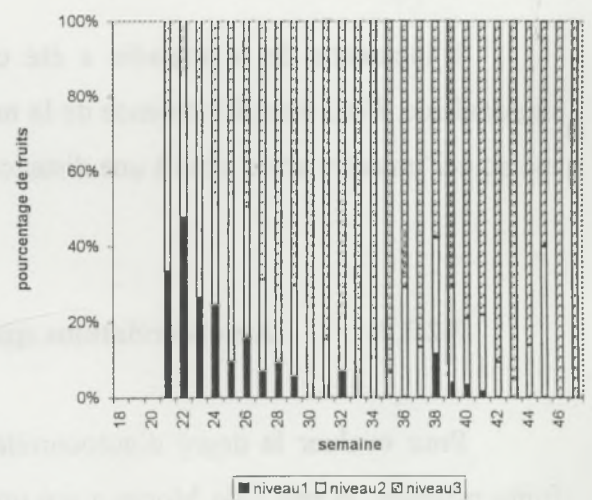
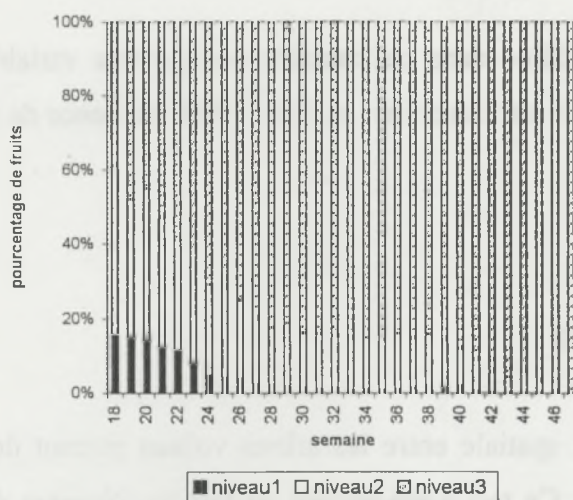
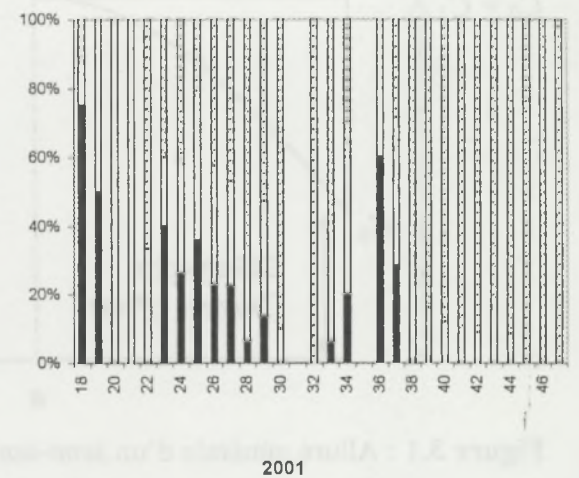
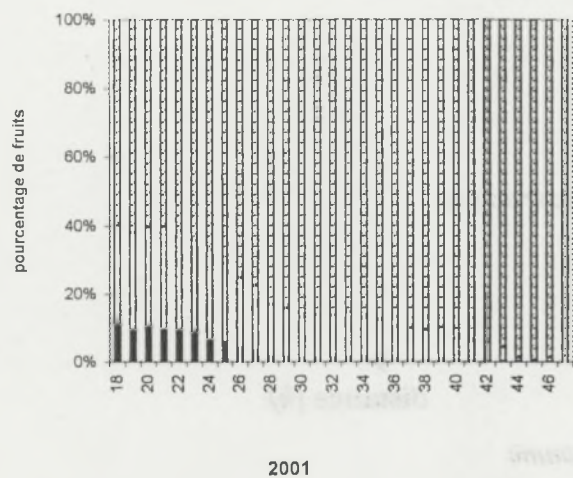
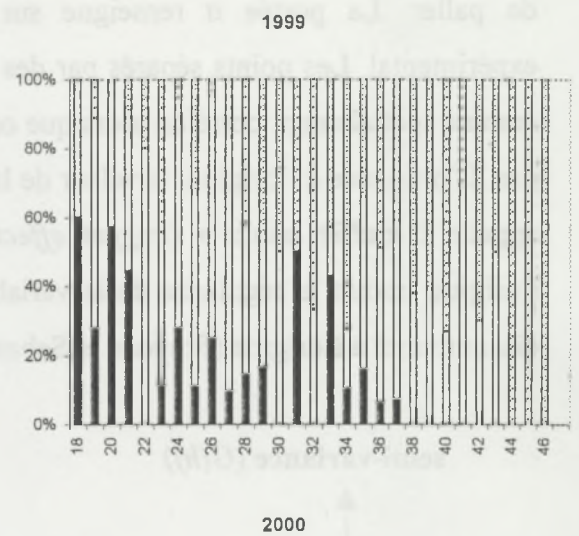
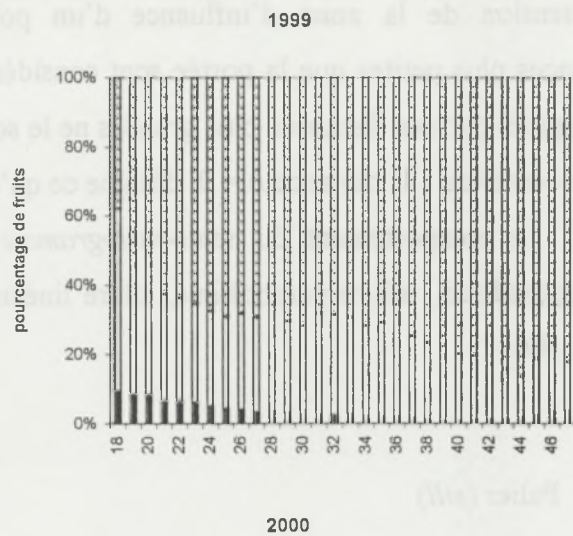


Figure 3.2 : Répartition des fruits par niveau de l'arbre à Mbankomo
(graphique de gauche: Total de cabosses; graphique de droite : Cabosses pourries)

L'équation de cette statistique est la suivante :

$$I = \frac{\frac{1}{N_h} \sum_{i=1}^{N_h} (Z_i - \bar{Z})(Z_{i+h} - \bar{Z})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2} \quad (3.3)$$

où N_h est le nombre de couples $(i, i + h)$, Z_i est l'observation à la $i^{\text{ème}}$ position, Z_{i+h} est l'observation à la position séparée de h unités de i et n est le nombre de points du réseau.

Plus l'autocorrélation spatiale sera forte, plus la valeur de I sera grande.

Pour tester l'autocorrélation spatiale, la statistique I standardisée (soustraction de la moyenne et division par l'écart-type) est comparée aux quantiles de la distribution normale standard, Φ^{-1} . L'hypothèse nulle de non corrélation spatiale positive à un décalage h (test unilatéral) est rejetée au seuil de signification de 5 % si l'expression (3.4) est vérifiée :

$$\frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} > \Phi_{95}^{-1} \quad (3.4)$$

où $E(I)$ représente la moyenne (ou l'espérance) de I et $\text{Var}(I)$ sa variance (Ristaino et Gumpertz, 2000).

Les cartes du nombre total de cabosses et de l'incidence de la maladie dans les différentes parcelles ainsi que l'étude des *semi-variogrammes* ont été faites avec le logiciel SAS version 8.2 (SAS, 2001). Les calculs d'autocorrélations spatiales ont été effectuées avec le logiciel S plus (2000), sur les données collectées pendant les trois années.

3.3. Résultats

3.3.1. Dynamique des symptômes de pourriture brune sur le fruit

L'infection peut débuter dans la dépression pédonculaire du fruit (zone proximale), sur le côté (zone médiane ou latérale) ou à l'extrémité distale du fruit (zone distale) (photos 1.2 et 1.3). Les attaques médianes sont ainsi qualifiées lorsqu'elles prennent naissance dans

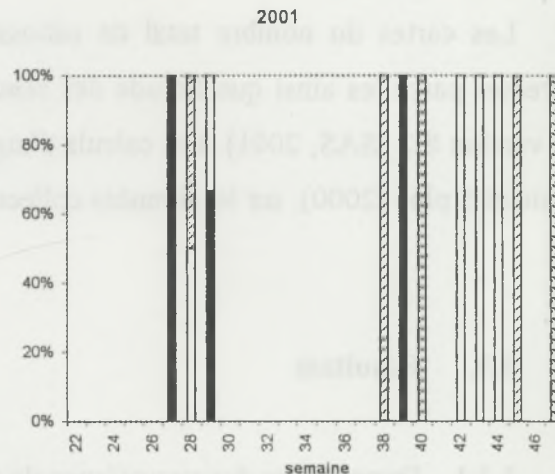
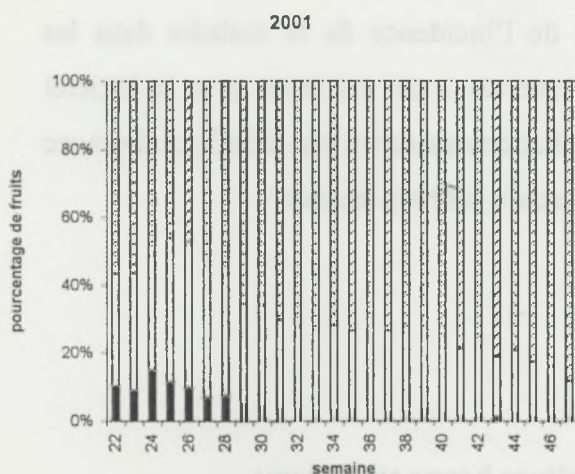
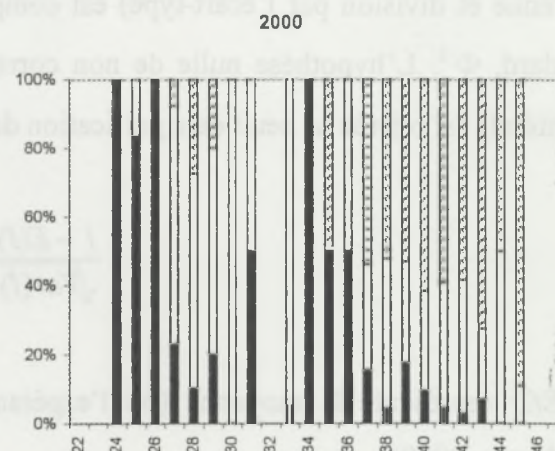
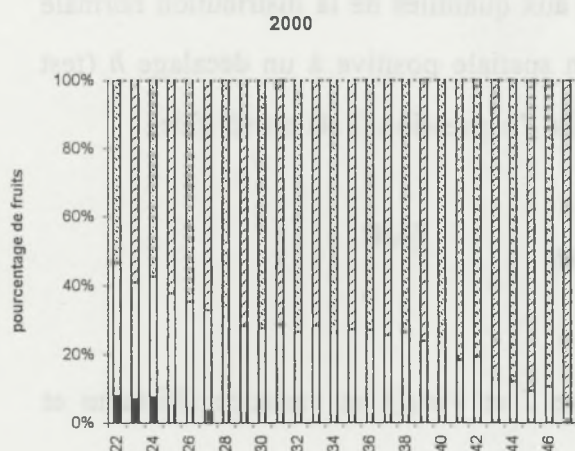
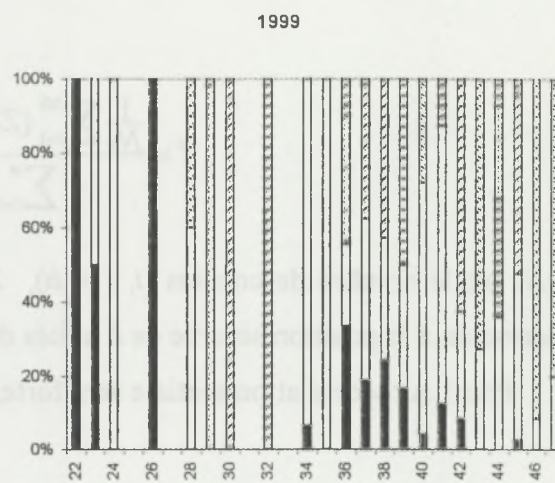
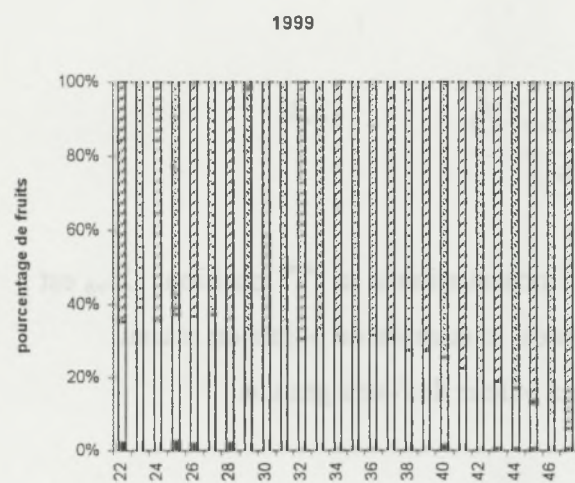


Figure 3.3 : Répartition des fruits par niveau de l'arbre à Goura
(graphique de gauche: Total de cabosses; graphique de droite : Cabosses pourries)

n'importe quelle partie des flancs de la cabosse, excepté la pointe distale et la dépression proximale (Babacauh, 1983b).

Le tableau 3.1 montre le pourcentage de symptômes apparaissant dans les différentes zones du fruit, par stade de développement. Ces valeurs représentent la moyenne de 3 années d'observations en parcelle paysanne à Mbankomo (1999 – 2001).

Tableau 3.1 : Position des premiers symptômes de pourriture brune par zone en fonction du stade de développement du fruit.

Zone	Stade de développement		
	Chérelle (%)	Jeune cabosse (%)	Cabosse adulte (%)
Proximal	41 (0.69) <i>a</i>	47 (0.75) <i>a</i>	50 (0.78) <i>a</i>
Médiane	27 (0.55) <i>b</i>	25 (0.53) <i>b</i>	25 (0.53) <i>b</i>
Distale	32 (0.60) <i>b</i>	28 (0.56) <i>b</i>	25 (0.53) <i>b</i>

Pour un stade de développement donné, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 5\%$. Les valeurs entre parenthèses représentent les moyennes des données transformées. La comparaison des moyennes a été faite par la méthode des contrastes.

Le tableau 3.1 montre qu'aux différents stades de développement du fruit, les premiers symptômes de pourriture apparaissent en majorité dans la zone proximale, au niveau du pédoncule, où le fruit est relié à l'arbre. Il n'existe pas de différence significative ($p > 5\%$) entre le pourcentage de fruits malades dont les lésions apparaissent en zone médiane et en zone distale.

Le test du Khi-deux, effectué sur les fréquences des lésions sur le cortex, s'est révélé non significatif (nombre de degrés de liberté : 4 ; $\chi^2_{\text{observé}} = 0.452$; $p = 0.978$). Dans les conditions de cet essai, des relations de dépendance n'ont donc pas été établies entre le stade de développement et la position de la lésion sur le cortex du fruit.

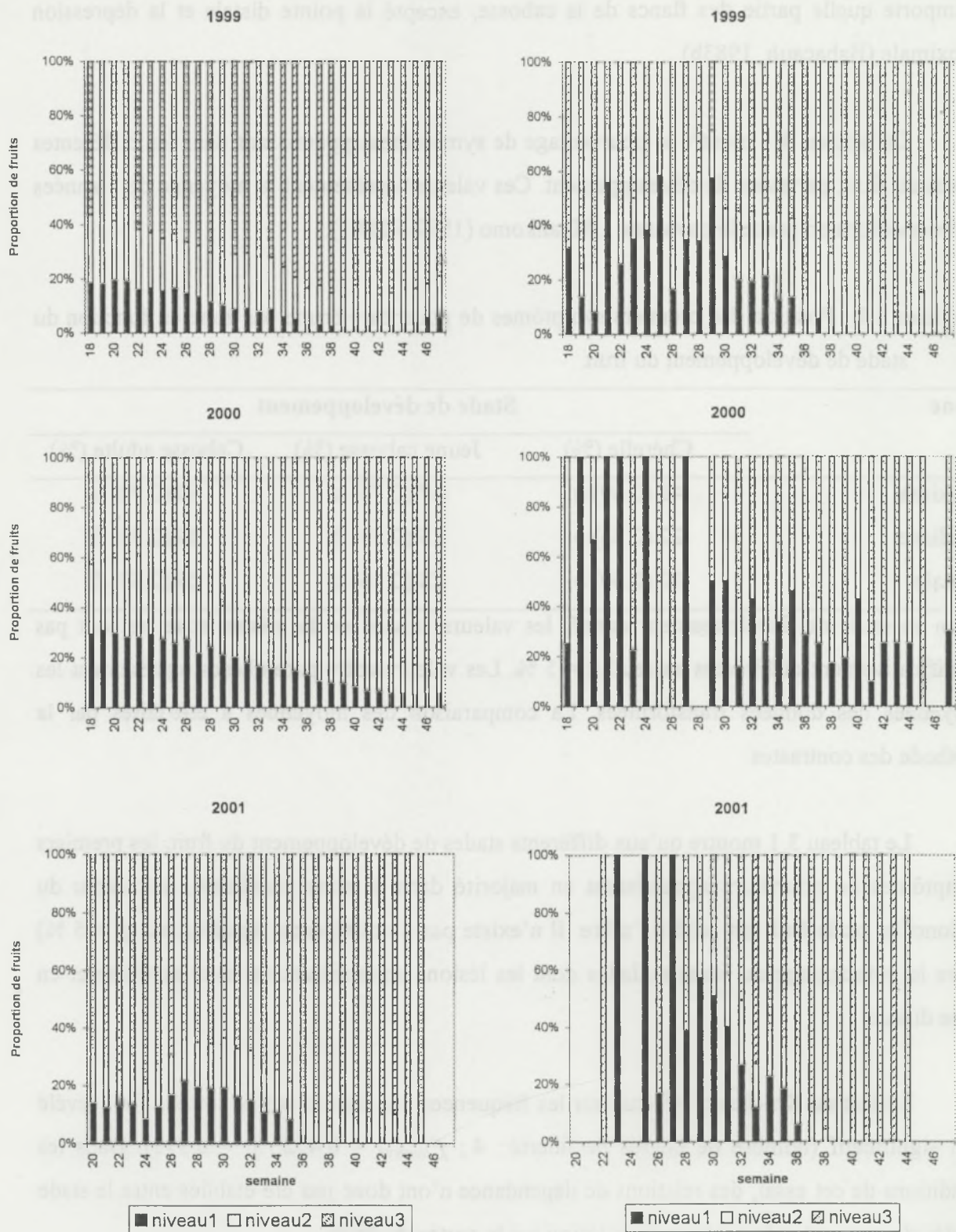


Figure 3.4 : Répartition des fruits par niveau de l'arbre à Barombi-Kang
(graphique de gauche: Total de cabosses; graphique de droite : Cabosses pourries)

3.3.2. Dynamique de la maladie à l'échelle de l'arbre

Les figures 3.2 à 3.4 représentent la répartition du nombre total de cabosses (*TOTCAB*) et du nombre de fruits pourris (*POUR*) par niveau (de chaque arbre) pendant la période de fructification de chacune des années d'observations.

A Mbankomo (figure 3.2), très peu de fruits ont été produits au niveau 1 de l'arbre, comparativement aux deux autres niveaux. La semaine 18 par exemple, il n'y a eu en 1999 que 10 % du nombre total de cabosses au niveau 1, contre 50 % au niveau 2 et 40 % au niveau 3. Le pourcentage de fruits apparus au niveau 1 a diminué au fil des semaines, alors que les fruits ont de plus en plus apparus au niveau 3. La même tendance de la répartition des fruits par niveau a été observée pendant les années 2000 et 2001.

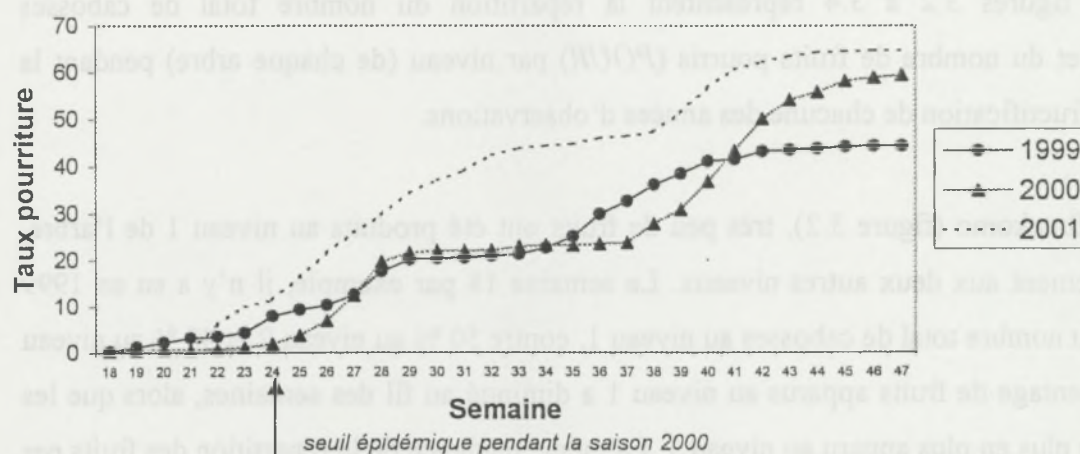
Exceptée la semaine 18 de l'année 1999 où les premiers fruits pourris dans ce site sont en majorité apparus au niveau 1 (60 %, contre 40 % au niveau 2), la maladie s'est de façon globale, développée dans tous les étages de l'arbre dans des proportions variables pendant les premières semaines d'observations au cours des trois années.

A Goura (figure 3.3), la parcelle est rentrée en production bien après celles des autres sites. Les observations y ont donc commencé relativement tard (quatre semaines après) par rapport à Mbankomo et à Barombi-Kang. Il y a également eu très peu de fruits formés au niveau 1 (moins de 5 % pendant les premières semaines d'observations en 1999, environ 10 % en 2000 et 2001). Le nombre de fruits au niveau 3 a toujours été le plus élevé.

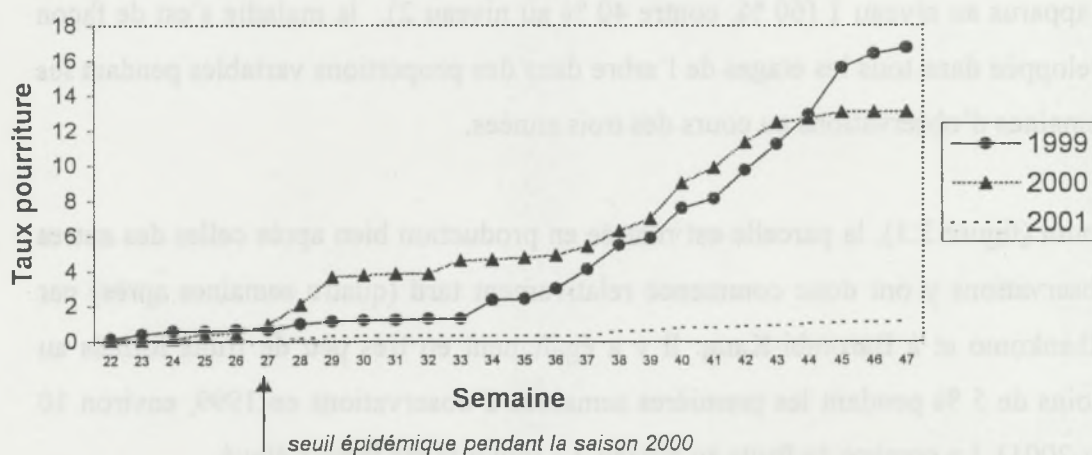
Pendant les années 1999 et 2000 à Goura, il est ressorti de façon plus ou moins nette que les premiers fruits malades sont observés au niveau 1. C'est seulement à partir de la semaine 29 qu'on observe les premiers fruits malades au niveau 3. Les résultats concernant l'incidence de la maladie en 2001 sont difficilement interprétables, compte tenu du taux de pourriture extrêmement faible observé cette année (< 2 %).

A Barombi-Kang (figure 3.4), le nombre total de fruits a, comme dans les autres sites, été plus élevé au niveau 3 qu'aux niveaux 1 et 2. Chaque semaine, la proportion des fruits formés au niveau 1 par rapport aux autres niveaux a évolué de façon décroissante, d'environ 20 % les premières semaines à moins de 5 % les dernières semaines d'observations. Le pourcentage des fruits produits au niveau 2 s'est montré relativement constant au cours des

Mbankomo



Goura



Barombi-Kang

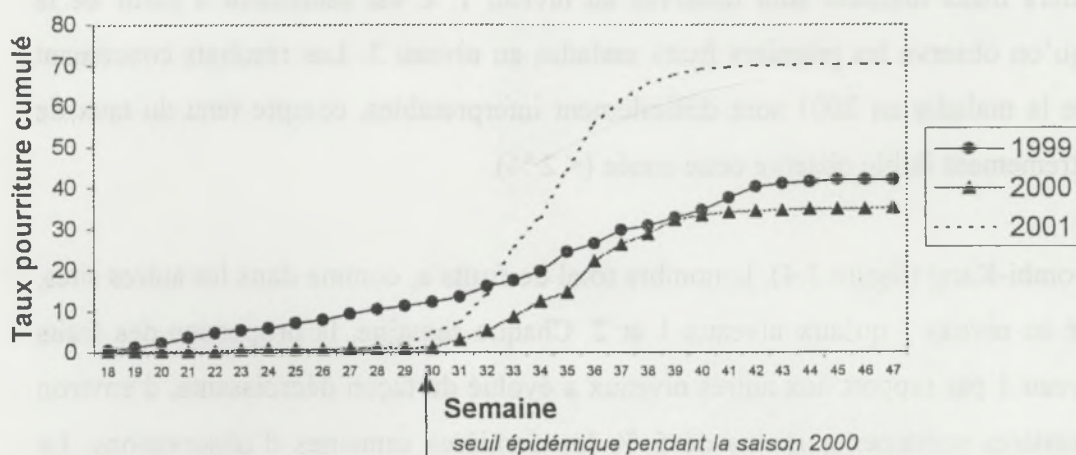


Figure 3.5 : Evolution de l'incidence de la maladie par année.

trois années d'observations (20 %). Quant au niveau 3, il y a eu accroissement de la proportion du nombre total de fruits d'environ 60 % à 80-90 %.

En 1999, dès la première semaine d'observations, la proportion de fruits atteints de pourriture brune a été plus élevée au niveau 3 (70 %) qu'au niveau 1 (30 %). En l'an 2000, 70 % des fruits malades ont été observés la première semaine au niveau 2, contre 30 % au niveau 1. En 2001, tous les premiers fruits malades (100 %) ont uniquement été observés au niveau 3. Au cours de la saison pendant les trois années, les fruits malades se sont globalement retrouvés dans tous les étages de l'arbre, avec une prédominance au niveau 3, où se retrouvait également le plus grand nombre total de fruits.

3.3.3. Dynamique de la maladie à l'échelle de la parcelle

3.3.3.1. Dynamique temporelle de la maladie

Les figures 3.5 et 3.6 montrent l'évolution du taux de pourriture et du nombre d'arbres portant des fruits malades dans les trois sites de 1999 à 2001. Les dates d'observations sont représentées en abscisse, et correspondent à la numérotation des semaines du calendrier civil. L'axe des ordonnées a chaque fois été ajusté en fonction de la valeur maximale prise par la variable étudiée.

A Mbankomo, les courbes d'évolution de la maladie présentent une allure générale en double-S (figure 3.5 a). Après une phase plus ou moins latente, l'épidémie a démarré de façon exponentielle vers les semaines 22-25 en fonction de l'année, et a atteint un premier palier aux semaines 27 (pour les années 1999 et 2000), et 32 (pour l'année 2001). Cette phase qui correspond à la saison sèche dans cette localité, a duré sept semaines en 1999 et en 2001, et dix semaines en l'an 2000. Une phase exponentielle a à nouveau démarré, jusqu'à un second palier atteint vers les semaines 42-45.

La première phase exponentielle a démarré à une date où le taux de pourriture cumulé était d'environ 5 % (seuil épidémique), atteint aux semaines 24, 25 et 22 en 1999, 2000 et 2001 respectivement (figure 3.5 a). A ces dates, seuls 22-25 % des arbres portaient des fruits malades (figure 3.6 a).

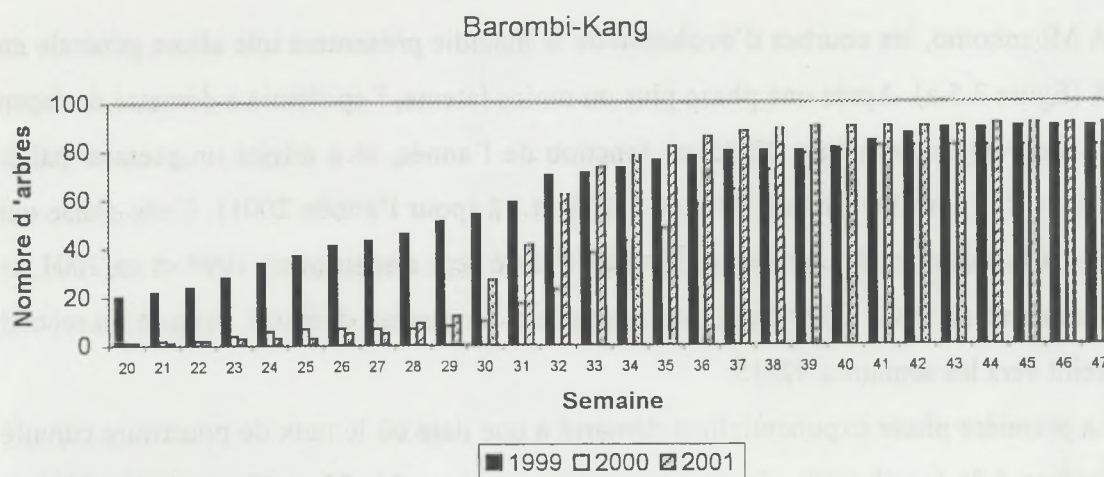
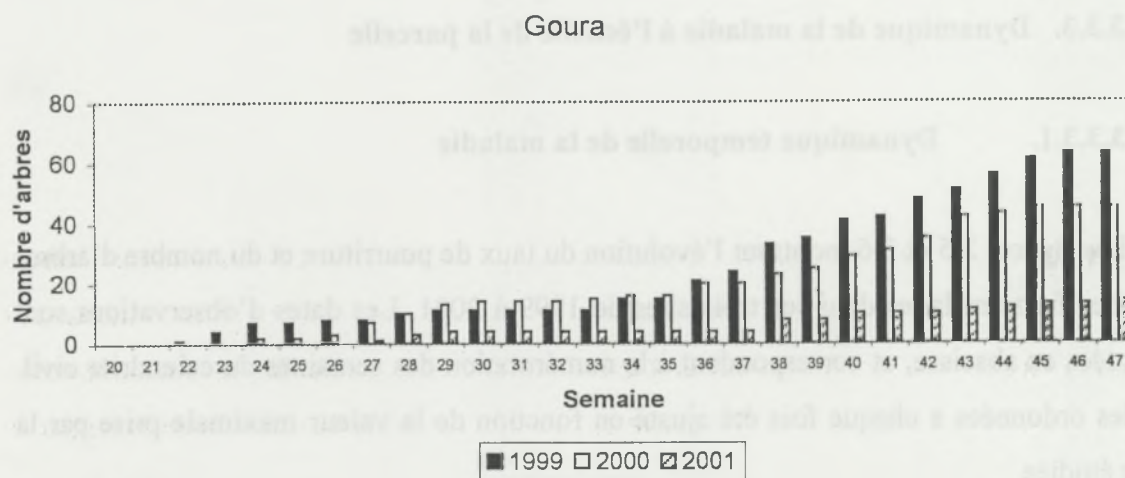
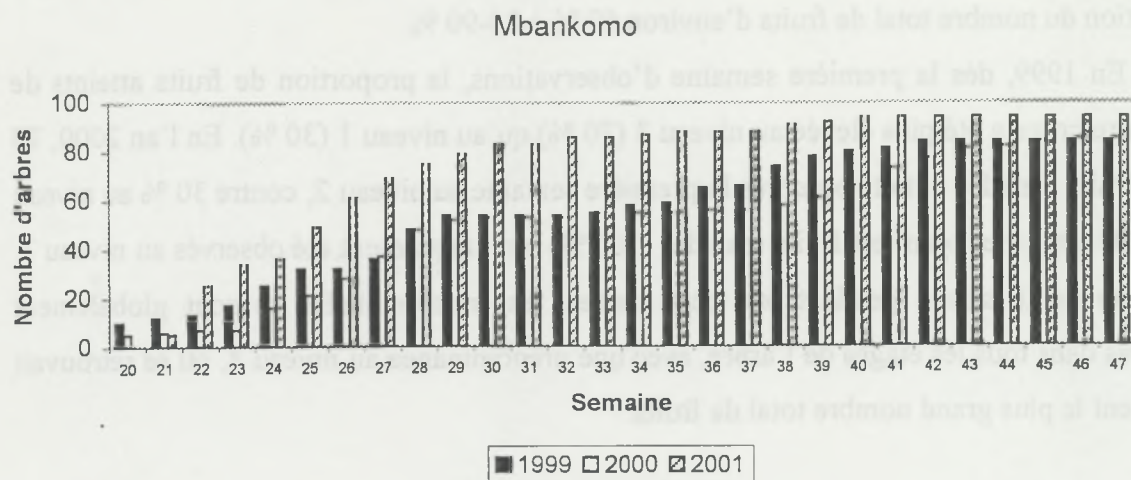


Figure 3.6 : Nombre cumulé d'arbres portant des fruits atteints de pourriture brune

A Goura, les taux de pourriture observés ont été beaucoup plus bas qu'à Mbankomo. L'incidence de la maladie a été tellement faible en 2001 (taux de pourriture final $< 2\%$) que nous n'interpréterons pas les résultats obtenus pendant cette année.

Les courbes évolutives de la maladie présentent également une forme en double-S plus ou moins marquée. Dans ce site, la phase exponentielle de la maladie a démarré à un taux de pourriture cumulé de 1% aux dates 27 et 33 en 2000 et 1999 respectivement (figure 3.5 b). A ces dates, seuls $8-10\%$ d'arbres portaient des fruits malades.

A Barombi-Kang, les taux de pourriture finaux étaient comparables à ceux de Mbankomo. Mais l'allure globale des courbes évolutives de la maladie est celle d'un simple-S. La période de latence a été relativement longue pendant les années 2000 et 2001. La phase exponentielle, moins marquée en 1999 qu'en 2000 et 2001, a démarré à la semaine 31, quand le taux de pourriture cumulé était de 5% environ (figure 3.5 c). A ce stade, $15-30\%$ d'arbres portaient des fruits atteints de pourriture brune.

3.3.3.2. Etude de la distribution spatiale

Le seuil épidémique peut être défini comme l'incidence de la maladie qui correspond au passage d'une progression linéaire de l'épidémie à une progression exponentielle. Quand ce seuil a été atteint dans les parcelles d'étude, moins de 30% des arbres en production portaient des fruits malades (figures 3.5 et 3.6). Les questions qui se posaient dès lors étaient de savoir d'une part, si les arbres concernés étaient ou non distribués de façon aléatoire dans la parcelle, et d'autre part, s'il existait une autocorrélation spatiale entre ces arbres. Les analyses n'ont pas été faites à Goura en 2001 parce que l'incidence de la maladie y a été presque nulle (figure 3.5b).

3.3.3.2.1. Représentations graphiques

Les cartes des parcelles relatives au nombre total de fruits et au taux de pourriture par site et par année ont été faites pour l'ensemble des semaines d'observations. A titre illustratif, les cartes correspondant sensiblement aux dates du début à la fin de l'épidémie espacées de 5 semaines ont été représentées dans les figures 3.7 à 3.17.

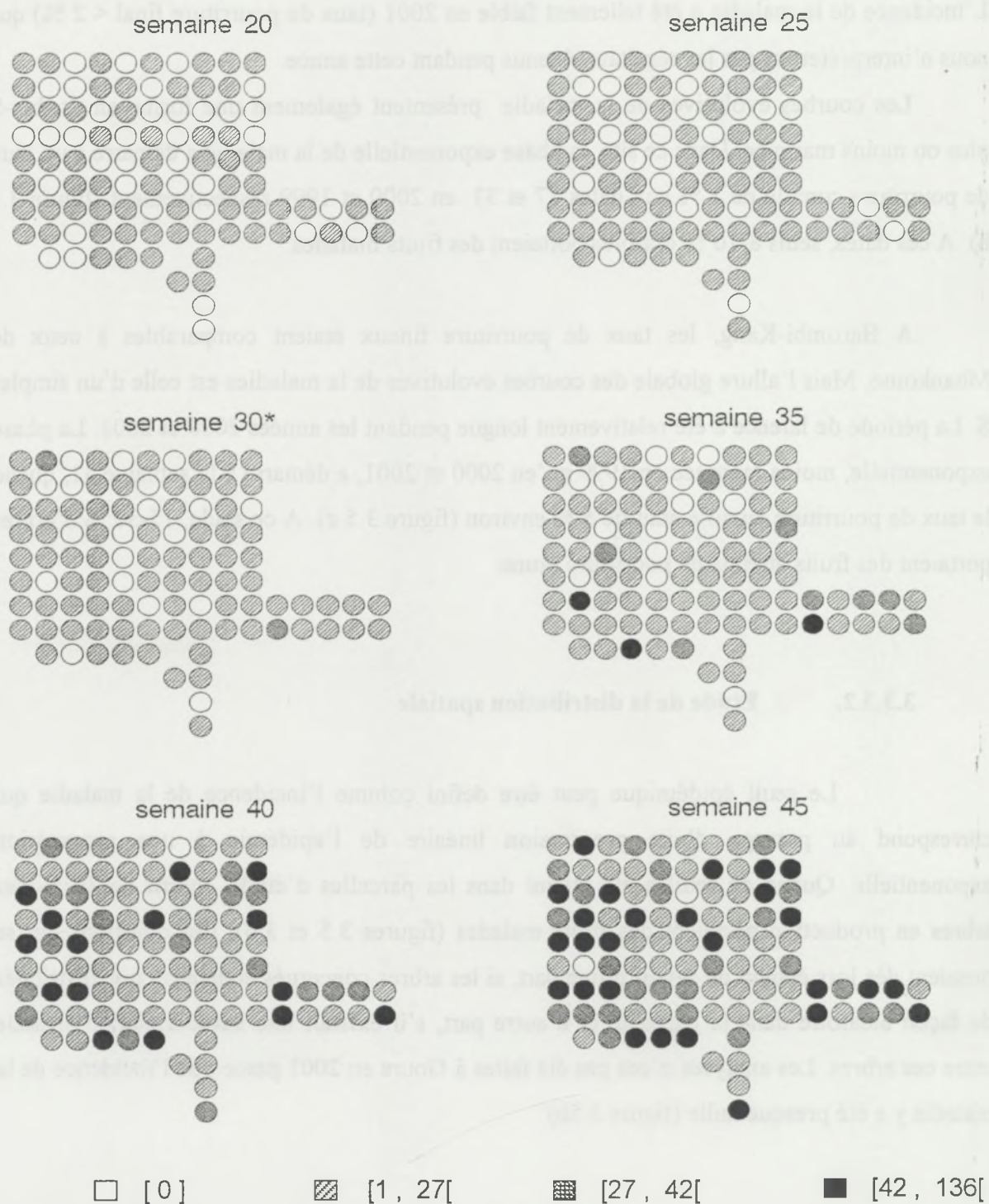


Figure 3.9 : Répartition du nombre total de cabosses par arbre à Barombi-Kang en 2000
 (* Début phase exponentielle de la maladie)

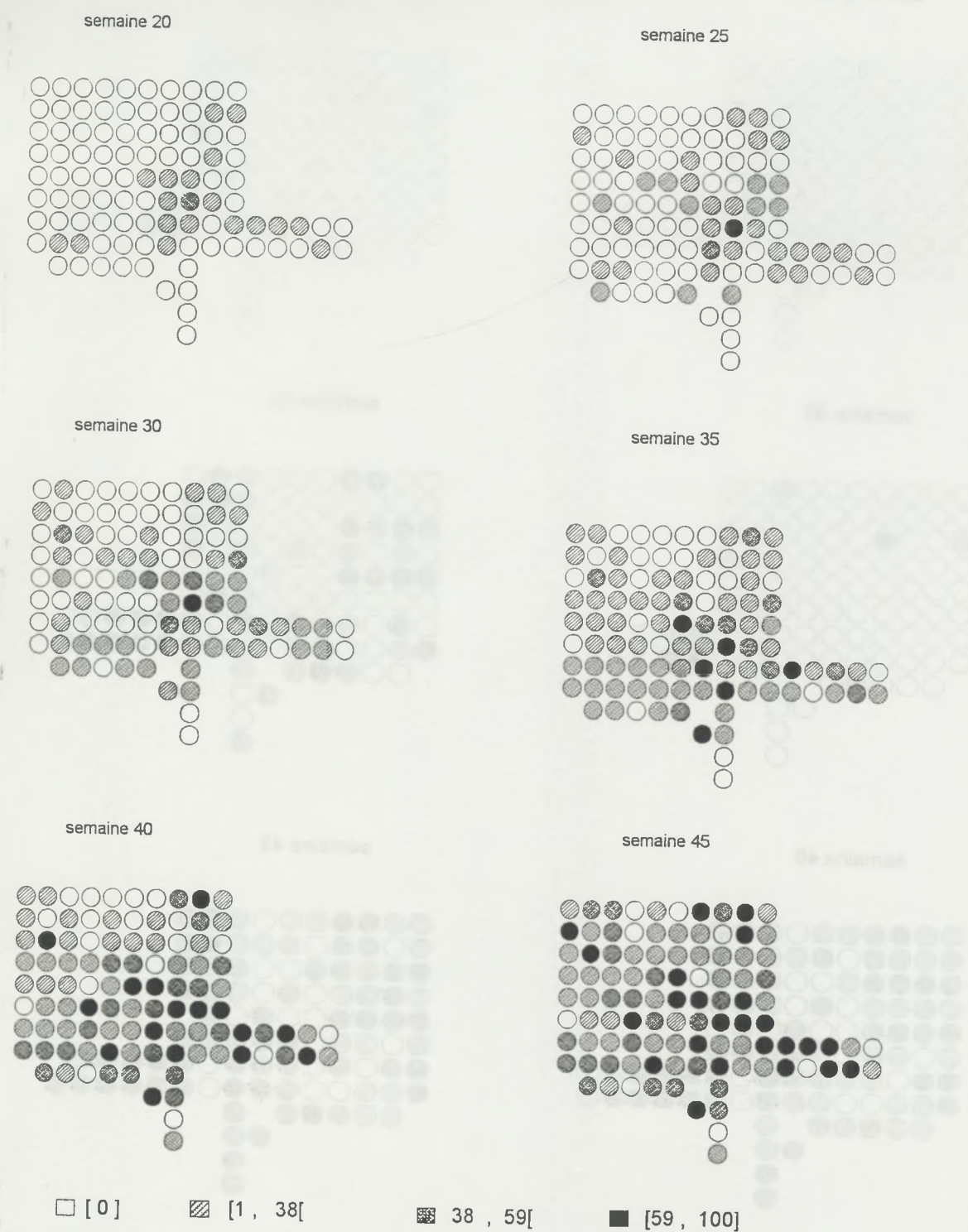
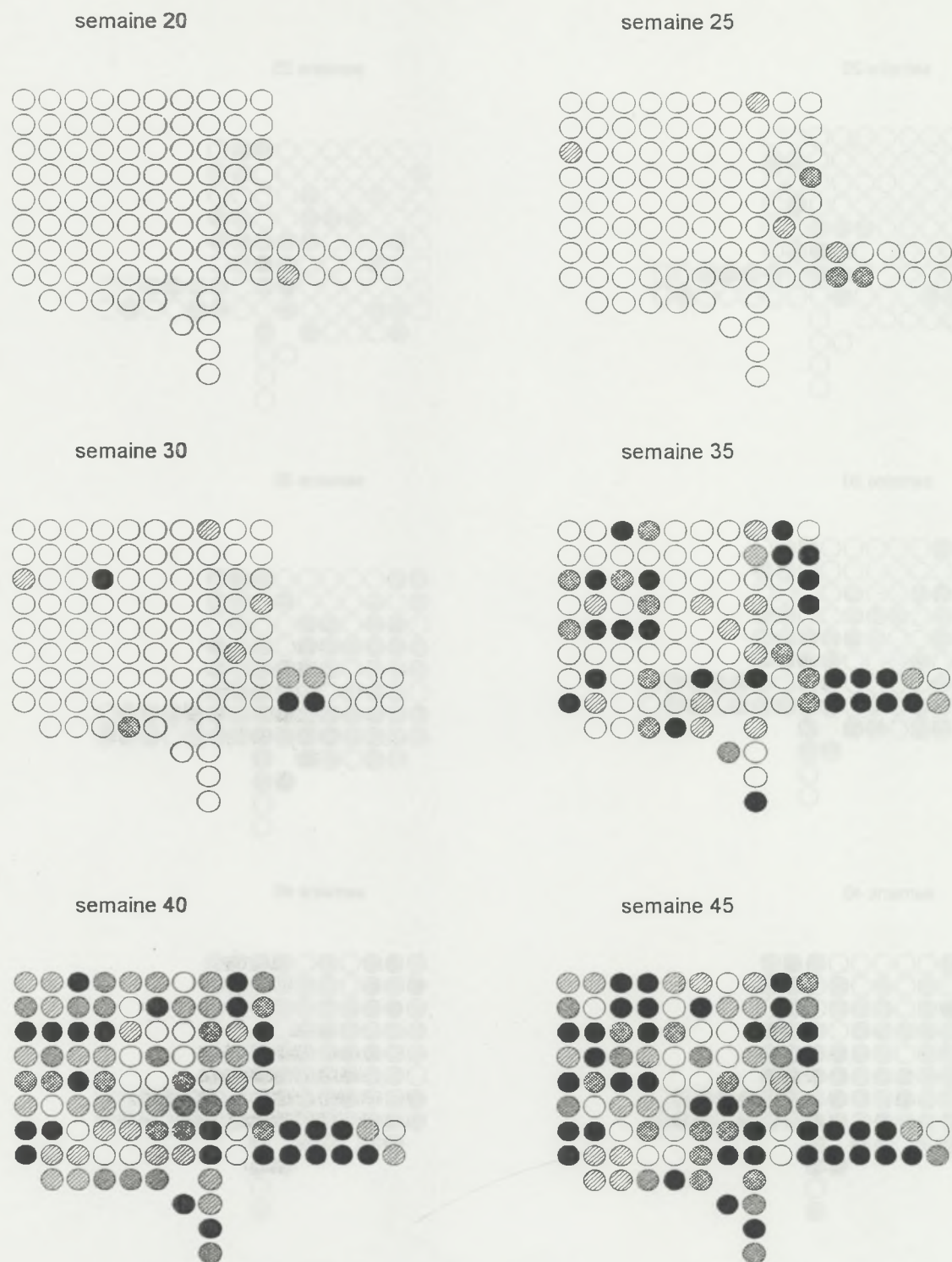


Figure 3.12 : Répartition de l'incidence de la maladie (en %) par arbre à Barombi-Kang en 1999



□ [0] ▨ [1 , 23[▩ [23 , 50[■ [50 , 100]

Figure 3.15 : Répartition de l'incidence de la maladie (en %) par arbre à Barombi-Kang en 2000

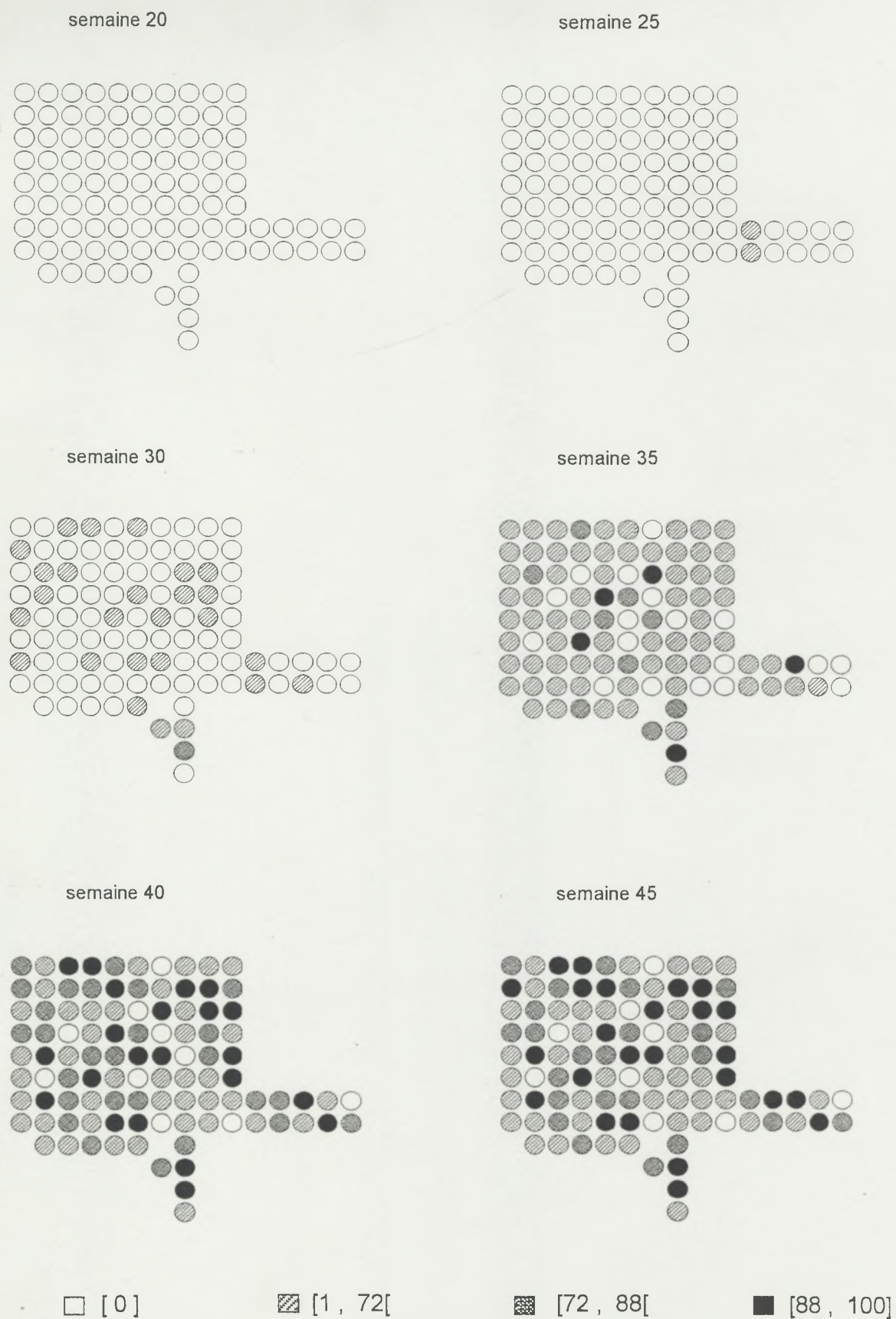


Figure 3.17 : Répartition de l'incidence de la maladie (en %) par à Barombi-Kang en 2001

Les cartes du nombre total de fruits ont été réalisées pour montrer la charge des arbres en fruits, pour les dates où les cartes du taux de pourriture ont été faites. Pendant la saison 2000 par exemple, les figures 3.7, 3.8 et 3.9 montrent que dans les différentes parcelles, plusieurs arbres portaient des fruits dès le début de la phase exponentielle de l'épidémie. La différence de niveau de production potentielle entre les parcelles a engendré des différences au niveau des bornes des intervalles, construits suivant la méthode des quartiles. A la semaine 45, par exemple, le quart des arbres porte de 25 à 92 fruits dans la parcelle de Mbankomo, 32 à 76 fruits à Goura et 42 à 136 fruits dans la parcelle de Barombi-Kang. En fin de saison, le nombre d'arbres ne portant pas de fruits était relativement élevé à Mbankomo (8 %) par rapport à Goura (1 %) et à Barombi-Kang (2 %). Dans toutes ces parcelles, la production semble globalement être répartie de façon aléatoire.

Les figures 3.10 à 3.17 montrent la répartition spatiale de l'incidence de la maladie au fil des semaines 20 à 45 dans les trois parcelles où les observations ont été faites pendant les trois années. Dans chacune des parcelles, la maladie a semblé commencer chaque année dans la même zone : bande centrale à Mbankomo, partie sud à Goura et zone sud-est de la parcelle à Barombi-Kang. Les bornes des intervalles ont également été très variables.

A Mbankomo et à Barombi-Kang, environ un quart des arbres ont perdu 50 à 100 % de leur production en 1999 et en 2000. Cet intervalle a même été rétréci en 2001, où 25 % des arbres ont eu 70-100 de pertes (figures 3.16 et 3.17). A Goura où l'incidence de la maladie est relativement moins forte, le quatrième intervalle est beaucoup plus élargi. Nous constatons qu'à la semaine 45 par exemple, un quart des arbres a perdu 26 à 100 % et 37 à 80 % de sa production pendant les saisons 1999 et 2000 respectivement (figures 3.11 et 3.14, annexe 3).

Dans chacun des sites, outre les arbres n'ayant pas porté de fruits à la semaine 45, il existe aussi des arbres qui n'ont pas du tout été atteints par la maladie. Le nombre de tels arbres a été plus élevé à Goura qu'à Mbankomo et Barombi-Kang.

A Mbankomo, dès la semaine 25, les arbres portant des fruits malades étaient répartis dans presque toute la parcelle, ce qui n'était pas le cas à Barombi-Kang et à Goura avant les semaines 35 et 40 respectivement. Dans ces deux derniers sites, l'évolution de la maladie semble présenter un gradient, ce qui est moins perceptible à Mbankomo.

Pour mettre en évidence des corrélations qui existeraient entre les arbres, des *semi-variogrammes* ont été étudiés.

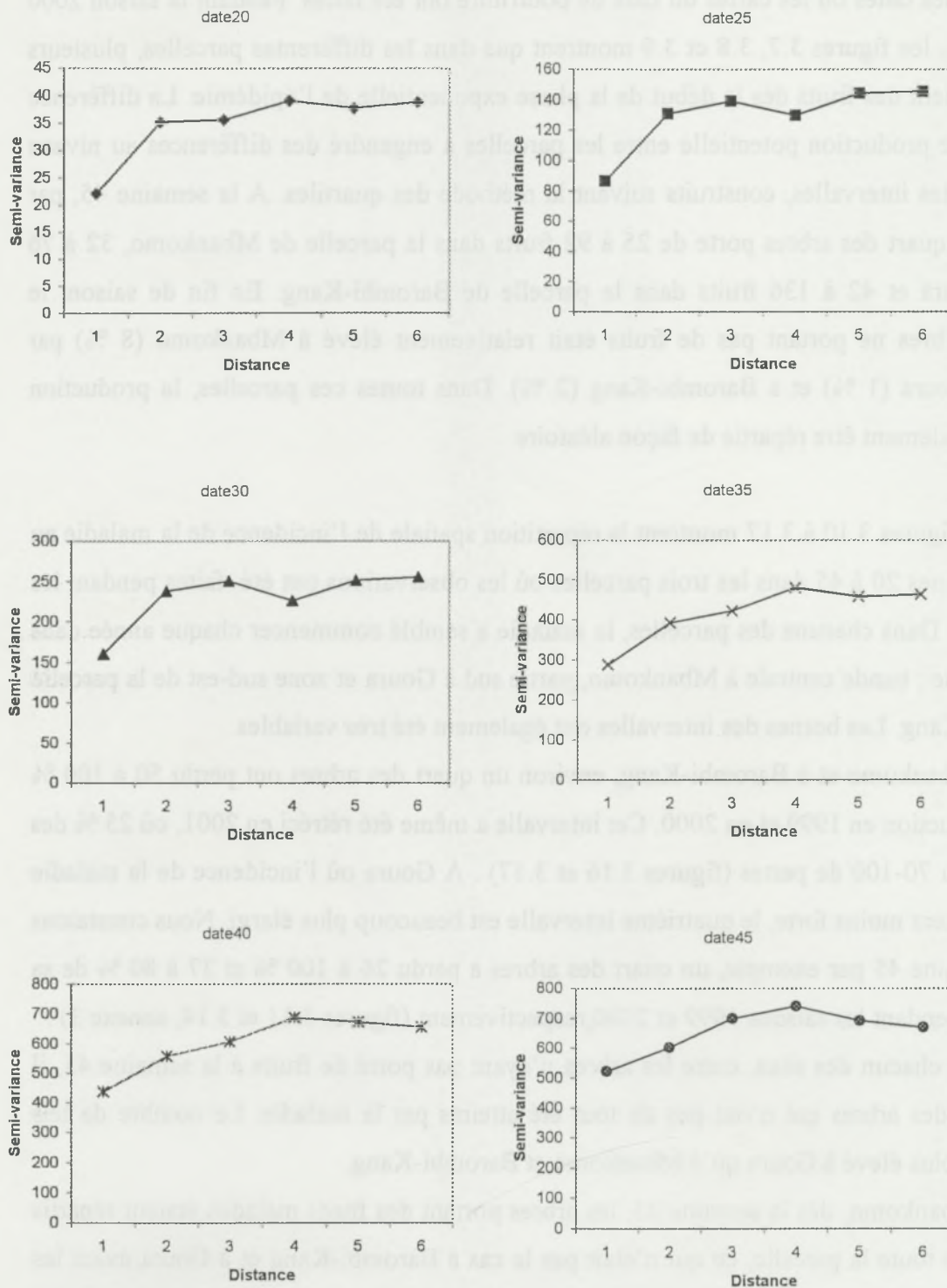


Figure 3.20 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année 1999 à Barombi-Kang

3.3.3.2.2. Etude des semi-variogrammes

Les *semi-variogrammes* ont été calculés dans plusieurs directions, pour explorer toute possibilité d'anisotropie. Les allures des différentes courbes ont semblé relativement homogènes quelle que soit la direction. Seules les distances ayant plus de 50 couples ont été retenues, pour avoir des courbes représentatives (Lecoustre et de Reffye, 1986).

Les figures 3.18 à 3.25 montrent les *semi-variogrammes* de l'incidence de la maladie à différentes dates des années 1999, 2000 et 2001. Tous présentent une forte discontinuité à l'origine (« effet pépité »). C'est une indication que l'incidence de la maladie présente une forte variabilité (présence d'une microstructure) à une échelle très inférieure à l'espacement des données (Freycon et Sebastien, 1991). A Mbankomo par exemple, aux semaines 30 et 35 des années 1999 et 2000 (figures 3.18 et 3.22), les *semi-variogrammes* prennent presque immédiatement leurs valeurs maximales, ce qui se traduit par des *semi-variogrammes* plats : c'est « l'effet pépité pur », indiquant que les corrélations sont nulles entre les arbres, quelle que soit la distance h qui les sépare.

A Goura et à Barombi-Kang, les *semi-variogrammes* ont néanmoins globalement montré, malgré la forte discontinuité, une allure parabolique, indiquant la présence d'une structure (figures 19, 20, 22, et 23). La présence de cette structure a été moins évidente à Barombi-Kang en 2001 (figure 3.25).

Ces *semi-variogrammes* nous fournissent des indications sur la portée de l'épidémie. Les phases de croissance des courbes ne sont jamais allées au delà 3 unités (axe des abscisses). 1 unité équivalant à 2,5 – 3 mètres, on peut dire que les corrélations spatiales sont presque nulles à des distance excédant 7,5-9 mètres.

A certaines dates (30, 35 et 40) dans ces deux sites, les courbes croissent dans un premier temps, puis décroissent, et croissent à nouveau (oscillation), phénomène qui laisse supposer l'alternance de groupes d'arbres sains et d'autres portant des fruits malades (foyers d'infestation) (Rémond, 1996 ; Ristaino et Gumpertz, 2000).

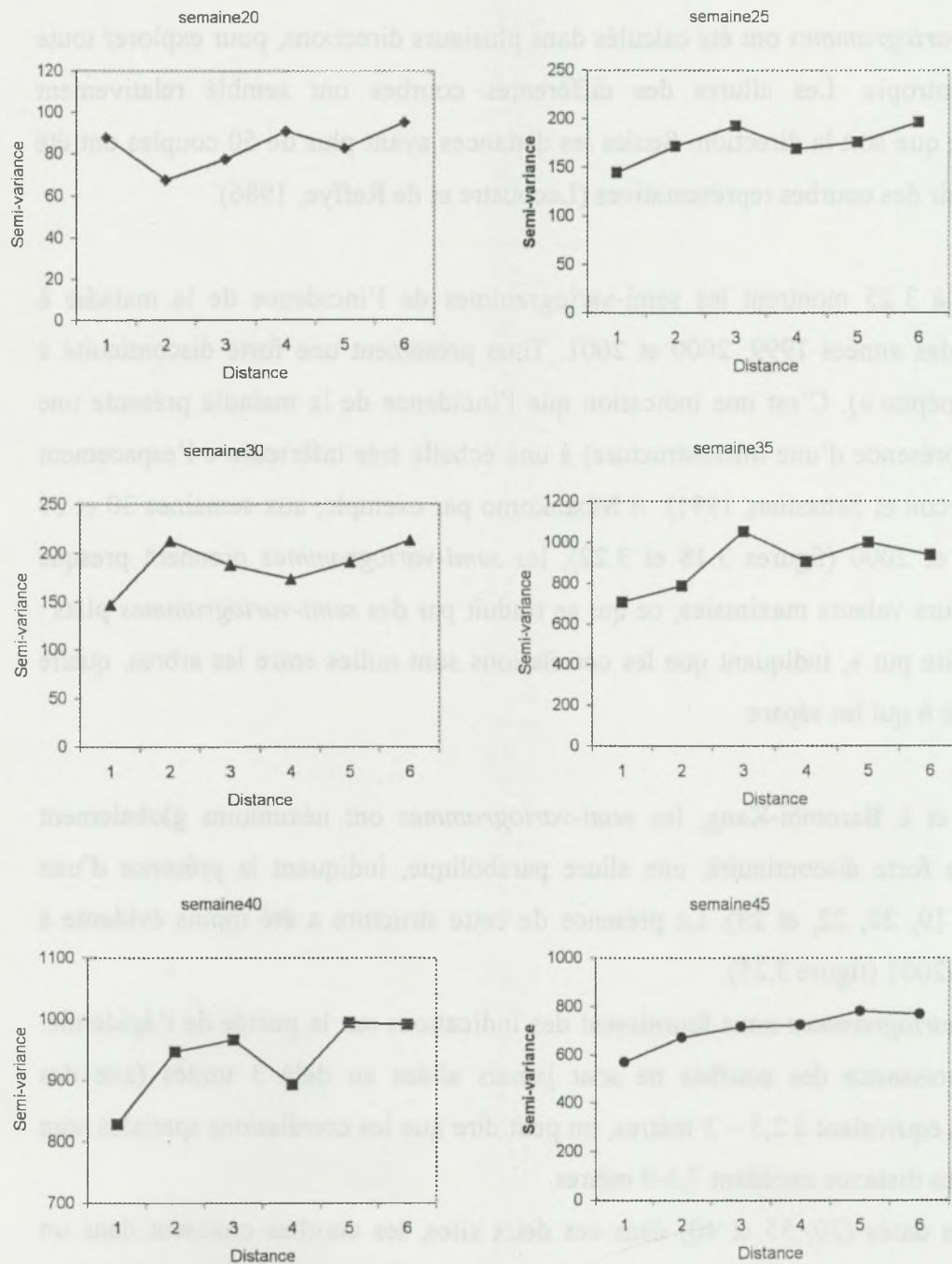


Figure 3.23 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année 2000 à Barombi-Kang

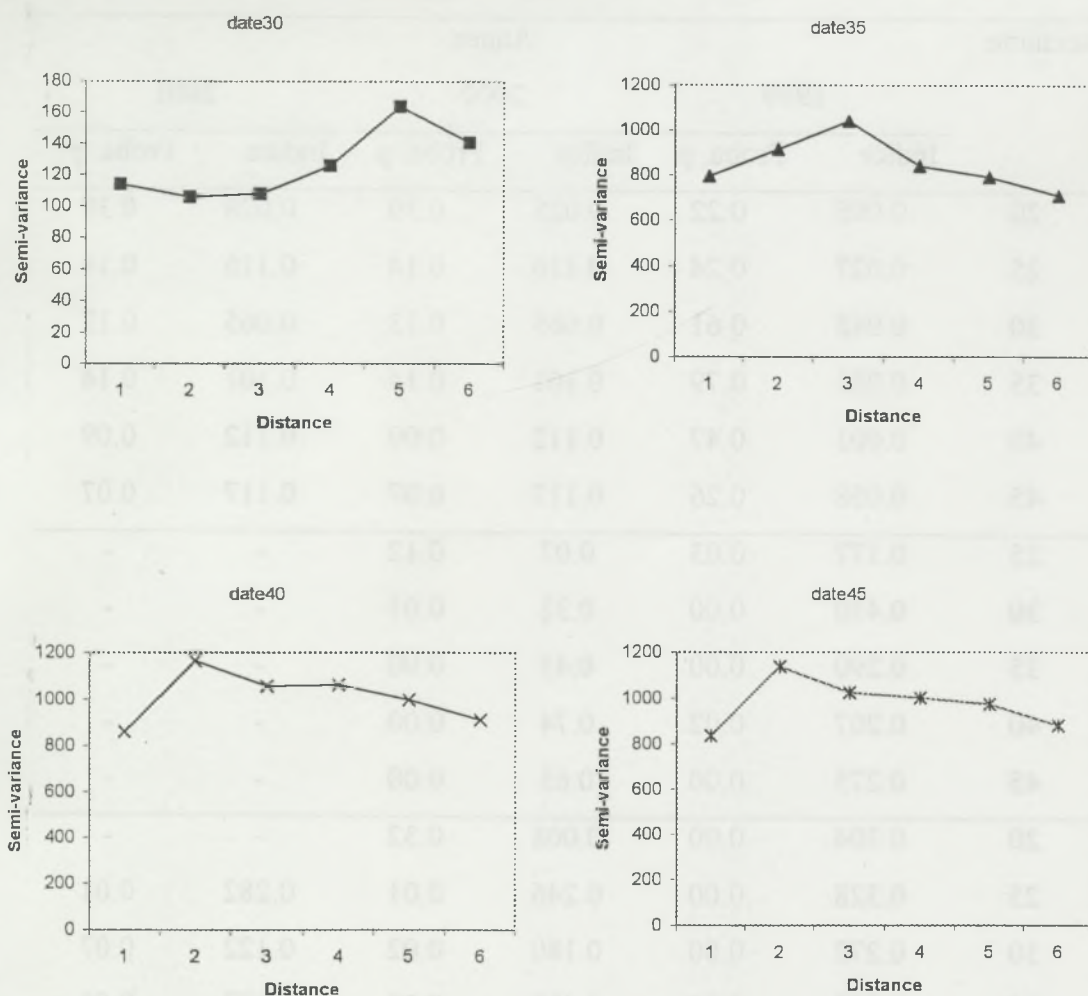


Figure 3.25 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année 2001 à Barombi-Kang

Tableau 3.2 : Statistiques du test *I* de Moran (1999 – 2001)

site	semaine	Année					
		1999		2000		2001	
		Indice	Proba. p	Indice	Proba. p	Indice	Proba. p
Mbankomo	20	0.005	0.22	0.028	0.39	0.028	0.39
	25	0.027	0.24	0.116	0.14	0.116	0.14
	30	0.048	0.61	0.065	0.13	0.065	0.13
	35	0.081	0.79	0.101	0.14	0.101	0.14
	40	0.001	0.47	0.112	0.09	0.112	0.09
	45	0.058	0.26	0.117	0.07	0.117	0.07
Goura	25	0.177	0.03	0.07	0.12	-	-
	30	0.450	0.00	0.32	0.01	-	-
	35	0.290	0.00	0.45	0.00	-	-
	40	0.207	0.02	0.74	0.00	-	-
	45	0.275	0.00	0.65	0.00	-	-
Barombi-	20	0.304	0.00	0.008	0.32	-	-
Kang	25	0.328	0.00	0.246	0.01	0.282	0.01
	30	0.272	0.00	0.180	0.02	0.122	0.07
	35	0.309	0.00	0.438	0.00	0.077	0.08
	40	0.273	0.00	0.214	0.00	0.076	0.16
	45	0.157	0.00	0.250	0.00	0.096	0.08

3.3.3.2.3. Autocorrélations spatiales

Le tableau 3.2 montre les statistiques du test *I* de Moran à différentes dates, réalisées avec les données collectées pendant les années 1999, 2000 et 2001 dans les trois sites d'observations.

A Mbankomo, pendant les trois années, l'indice *I* n'a jamais été significatif au seuil de 5 %, ce qui confirme l'absence d'autocorrélation spatiale dans la parcelle où l'étude a été menée. Pendant les années 1999 et 2000 à Goura et à Barombi-Kang, exceptées les semaines 25 et 30 dans chacun des sites respectivement en l'an 2000, les valeurs de l'indice *I* ont été plus élevées, et toujours significatives au seuil de 5 %, indiquant ainsi l'existence de corrélations entre les arbres de la parcelle dans chacun de ces sites. En 2001 en revanche, l'indice *I* de Moran n'a été significatif qu'à la semaine 25.

3.4. DISCUSSION

La pourriture brune est une maladie du cacaoyer qui s'exprime essentiellement sur les fruits. Même si certains symptômes apparaissent sur le tronc comme le chancre en Papouasie Nouvelle-Guinée, les cabosses sont les principaux organes touchés. Cette étude a permis de connaître quantitativement les endroits du cortex où apparaissent les premiers symptômes de la maladie au Cameroun : environ 46 % en zone proximale, 26 % en zone médiane et 28 % en zone distale. Ces observations concordent avec celles obtenues par Babacauh (1983) dans la région d'Abidjan en Côte d'Ivoire. Ces résultats contrastent en revanche avec l'idée couramment répandue selon laquelle les taches apparaissent essentiellement aux extrémités du fruit, la stagnation des gouttelettes d'eau à ces endroits les rendant plus vulnérables. La forte proportion des lésions observée en zone proximale peut s'expliquer par le fait que la cabosse différencie une dépression péripédonculaire. Celle-ci constitue un collecteur susceptible de retenir de l'eau nécessaire à la germination des zoospores (Babacauh, 1984b). Cet auteur explique l'importance des lésions latérales par différentes situations allant de l'obliquité des fruits au contact des fruits sains avec les fruits malades. L'orientation verticale du fruit et sa forme, favorables à l'accumulation des entités infectieuses, expliquent la présence des lésions dans la partie distale du fruit.

Les observations faites pendant trois années consécutives ont montré d'une part qu'il n'y a pas de relations de dépendance entre le stade de développement et la position des lésions sur le cortex du fruit, d'autre part qu'il n'existe pas de différence significative ($p > 5\%$) entre les proportions en zone médianes et distales du cortex, mais la différence est significative ($p < 1\%$) entre la proportion des lésions dans chacune de ces deux dernières et la zone proximale. La conséquence pratique de ces résultats est la nécessité de bien appliquer les produits phytosanitaires sur l'ensemble du fruit, au lieu d'insister uniquement sur les extrémités du cortex.

A l'issue de ces travaux, deux schémas se dégagent de la dynamique de l'épidémie au niveau de l'arbre :

- Le premier schéma, observé à Mbankomo et à Goura, est une tendance ascensionnelle de l'évolution de la maladie. La première semaine d'observation, la maladie se manifeste de façon prédominante au niveau du tronc (niveau 1). Ceci fait penser qu'une bonne partie de l'inoculum provient du sol, les fruits de la base étant les premiers à être contaminés par le phénomène de *splashing* ou par le biais des insectes rampant (fourmis...). Ces résultats confirment ceux obtenus par Muller (1974a). Cependant, la première semaine d'observations, il a été également observé dans ces sites, bien que dans des proportions relativement plus faibles, des fruits malades dans les étages supérieurs de l'arbre.

- Le deuxième schéma, observé à Barombi-Kang, ne laisse apparaître aucune tendance de l'incidence de maladie au sein de l'arbre. Dès la première semaine d'observations, les fruits malades se retrouvent dans des proportions plus ou moins équivalentes dans les différents étages de l'arbre.

Ces résultats confortent la thèse de la présence de l'inoculum primaire tant au sol qu'en diverses autres parties du cacaoyer. Les schémas précédemment décrits se manifestent dans deux zones agro-écologiques différentes, l'une (zone IV) à pluviométrie monomodale caractérisée par une longue saison des pluies (9 mois) et une petite saison sèche (3 mois), l'autre (zone V) à pluviométrie bimodale avec deux saisons des pluies intercalées par deux saisons sèches de plus ou moins même longueur (figure 1). L'abondance des pluies dans la zone IV rendrait plus rapidement actif l'inoculum conservé dans les différents sites de l'arbre, d'où la contamination des fruits éloignés du sol.

Le fait d'avoir observé des fruits malades dès les premières semaines d'observations aux niveaux 2 et 3 du cacaoyer remet en question le protocole de traitement recommandé jusqu'ici par l'IRAD, qui propose que pendant la saison des pluies en zone V, les traitements phytosanitaires soient appliqués uniquement sur les cabosses du tronc, et qu'ils ne soient généralisés à toutes les cabosses qu'à la seconde saison des pluies (Muller, 1984 ; Berry, 1999). En procédant ainsi, beaucoup de fruits malades seraient laissés sur les arbres, constituant ainsi une source d'inoculum secondaire pour la propagation de la maladie.

Ces travaux ont permis d'étudier la répartition spatio-temporelle de l'épidémie au sein d'une parcelle de cacaoyers. Les cartes représentatives de la production et du taux d'attaque ont d'abord permis d'avoir une impression visuelle. Alors que la production semblait être répartie de façon aléatoire dans les trois parcelles, l'incidence de la maladie quant à elle, paraissait présenter un gradient à Goura et à Barombi-Kang. Ces impressions ont été confirmées par les analyses géostatistiques, les *semi-variogrammes* ayant à plusieurs dates des allures paraboliques dans ces deux derniers sites, et étant plutôt plats à Mbankomo. Les analyses d'autocorrélations spatiales ont également montré l'existence des corrélations positives à Goura et à Barombi-Kang, alors qu'aucune corrélation n'a été significative à Mbankomo.

La révélation par les *semi-variogrammes* d'une structure dans les parcelles de Goura et Barombi-Kang, et l'existence d'autocorrélations significatives entre les arbres portant les fruits malades sont des indications d'une contamination de proche en proche de la maladie. La différence de résultats obtenus entre Mbankomo d'une part, et Goura et Barombi-Kang d'autre part, pourrait s'expliquer par la différence d'âge de ces parcelles. La parcelle de Mbankomo est plus ancienne, d'une dizaine d'années environ, que les deux autres. Au fil des années, l'inoculum primaire aurait eu le temps d'être disséminé dans toute la cacaoyère, d'où l'éparpillement aléatoire des arbres portant des fruits malades.

Tous les *semi-variogrammes* ont présenté une forte discontinuité à l'origine (« effet pépité »). C'est une indication qu'une grande fraction de la variance de l'incidence de la maladie est imputable à une échelle plus petite que celle étudiée (Savary et *al.*, 2001), fort probablement celle de l'arbre. Pour des travaux futurs, il pourrait être intéressant de considérer comme unité expérimentale non pas l'arbre portant des fruits, mais les fruits eux-même en prenant en considération tous ceux qui les entourent.

CHAPITRE 4 : IMPACT DU PRELEVEMENT DES FRUITS MALADES SUR LA PRODUCTION ET LE TAUX DE POURRITURE BRUNE DES CABOSSES DU CACAOYER AU CAMEROUN.

4.1 Introduction

Nous avons parlé dans les chapitres précédents de la place prépondérante qu'occupe la pourriture brune parmi les maladies qui attaquent le cacaoyer, ainsi que des dégâts importants causés par ce fléau.

Les méthodes généralement préconisées pour lutter contre la pourriture brune des cabosses du cacaoyer sont entre autres la lutte chimique, la lutte génétique, la lutte biologique et la lutte culturale. Parmi ces méthodes, la lutte culturale paraît être la plus simple à mettre en œuvre, tant sur le plan des coûts que sur celui de la préservation de l'environnement. Il s'agit d'un ensemble de méthodes permettant de créer des conditions défavorables au développement de l'agent pathogène. Le prélèvement des fruits par exemple, qui est l'une de ces mesures prophylactiques, consiste à nettoyer les arbres en début de campagne des fruits momifiés de la campagne précédente, et à éliminer régulièrement les fruits malades, source potentielle d'inoculum secondaire.

Au Cameroun, Muller (1974b) a montré que l'effet du prélèvement hebdomadaire des fruits malades des parcelles variait beaucoup non seulement suivant les années, mais aussi d'une parcelle à une autre, et que cette variation était conditionnée par le climat. Ces essais avaient pour objectif d'étudier l'effet des mesures prophylactiques sur la dissémination du *Phytophthora palmivora*. Or des études de Nyassé (1992) ont révélé que c'est l'espèce *P. megakarya* qui est prépondérante dans les parcelles de cacaoyers au Cameroun. Il y avait donc une sorte de confusion quant à l'application des résultats de Muller dans le contexte actuel. Partiot et al. (1984) ont confirmé que l'impact du prélèvement des fruits malades est très dépendant des facteurs climatiques. Son action se traduit surtout par une diminution de la vitesse d'évolution de l'épidémie sur les fruits situés dans les branches, notamment dans des conditions de pression infectieuse modérée. Tondjè et al. (1993) ont testé plusieurs combinaisons de pratiques culturales dans une parcelle expérimentale constituée d'un seul hybride et régulièrement désherbée. Le meilleur résultat a été obtenu avec une taille et une suppression des cabosses momifiées en début de campagne, suivis de récoltes sanitaires

hebdomadaires. Cependant, cette étude a été conduite pendant une seule année et en station expérimentale. Aucun des essais précédemment décrits n'a été mené dans des conditions qui reflètent autant que possible les pratiques paysannes courantes, et il y a eu très peu, voire même pas du tout, de répétitions dans le temps et dans l'espace. Au Pérou, Soberanis et *al.* (1999) ont mené en milieu paysan une étude dont l'objectif était de faire des recommandations pour lutter contre la maladie, basées sur la fréquence du prélèvement des fruits malades (espacement d'une semaine d'une part et de 15 jours d'autre part). Les auteurs ont montré que le prélèvement des fruits malades fait de façon hebdomadaire provoquait une diminution relative du taux de pourriture brune de 35 à 66 %.

L'objectif du présent essai est de mesurer, en parcelles paysannes, l'effet du prélèvement des fruits malades sur l'incidence de la pourriture brune des cabosses et sur la production de cacao, et d'évaluer ainsi la part de l'infection due aux cabosses malades qui constituent l'inoculum secondaire. L'étude a été conduite pendant deux années consécutives, dans des parcelles reflétant les conditions moyennes de production de la cacaoculture camerounaise. Ses conclusions pourraient servir de base à l'amélioration des recommandations pratiques de méthodes de lutte contre la pourriture brune.

Des analyses statistiques innovantes, basées sur le modèle linéaire généralisé mixte, ont été effectuées.

4.2 Matériel et méthodes

4.2.1 Description des sites et dispositif expérimental

Les travaux de cette étude ont été menés pendant deux années consécutives (1998 et 1999), dans deux parcelles paysannes situées à l'une Ngoulessman et l'autre à Elalè (figure 2). Ces deux sites appartiennent à la zone agro-écologique V, caractérisée par l'alternance de deux saisons de pluies et deux saisons sèches.

Ngoulessaman, une localité de la province du Sud (département de la Mvila), est située à une altitude de 550 mètres, avec des sols ferrallitiques fortement désaturés. Elalè,

située à 520 mètres d'altitude, est une localité appartenant à la province du Centre (département du Nyong-et-Kellé), avec des sols ferrallitiques moyennement désaturés.

Le dispositif expérimental adopté a été celui en blocs complets randomisés. Il est constitué de 8 et 10 blocs à Elalè et à Ngoulessaman, respectivement, la parcelle mise à disposition à Elalè étant de plus petite taille que celle de Ngoulessaman. Dans chacun des blocs, deux traitements ont été comparés : le traitement 1 (*T1*), représentant la parcelle sans prélèvement de fruits malades et le traitement 2 (*T2*), représentant celle où est effectué le prélèvement de fruits malades. Les parcelles élémentaires contenaient 25 arbres chacune, et étaient séparées les unes des autres par deux lignes de cacaoyers. Il y a donc eu 500 et 400 arbres utiles respectivement à Ngoulessaman et à Elalè.

4.2.2 Analyses statistiques

Les variables climatiques et d'état sanitaire mesurées ont été les mêmes que celles décrites dans les chapitres 2 et 3. Le mode de calcul du taux de pourriture est inspiré des formules utilisées par Berry et Cilas (1994b) et De Jesus (1992) (cf § 2.2.3.1 et 3.2.3).

Les données climatiques de l'année 1998, incomplètes, n'ont pas été prises en compte.

Les courbes de progression de la maladie ont été tracées pour analyser l'effet des traitements sur le développement temporel de l'épidémie.

Les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant trois modèles différents :

- Le **Modèle Linéaire Général** avec la procédure GLM de SAS, suivant l'équation (3) (Draper et Smith, 1991) :

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ij} \quad (3)$$

où *i* symbolise le facteur « bloc » et varie de 1 à 10, *j* représente le facteur « traitement » et varie de 1 à 2, *y_{ij}* est le nombre de fruits de chacune des variables d'état sanitaire (pourris, wiltés, etc...) dans la *ij^{ème}* combinaison bloc-traitement, μ est la moyenne générale, α_i est

l'effet bloc, β_j est l'effet traitement et e_{ij} est la variation résiduelle. μ , α_i , β_j sont des effets fixes. La fonction de lien était l'identité et les résidus étaient supposés suivre une distribution normale.

- **Le Modèle Linéaire Généralisé** avec la procédure GENMOD de SAS, suivant l'équation (4) (Agresti, 1990) :

Données en pourcentage:

$$\ln[p_{ij}/(1-p_{ij})] = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ij} \quad (4)$$

Données de comptage:

$$\ln(y_{ij}) = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ij} \quad (5)$$

où p_{ij} est la probabilité de pourriture (nombre de fruits malades sur nombre total de fruits dans le bloc i et le traitement j), μ , α_i , β_j sont des effets fixes. La fonction de lien est le logit pour les données de pourcentage et le logarithme pour les données de comptage. Les résidus des données de pourcentage étaient supposés suivre une distribution binomiale, alors que ceux des données de comptage étaient supposés suivre une distribution de Poisson.

- **Le Modèle Linéaire Généralisé Mixte** avec la macro GLIMMIX de SAS (Littel et al., 1996) :

Données en pourcentage:

$$\ln[p_{ijk}/(1-p_{ijk})] = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha_i\beta_j + c_{ijk} + e_{ijk} \quad (6)$$

Données de comptage:

$$\ln(y_{ijk}) = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha_i\beta_j + c_{ijk} + e_{ijk} \quad (7)$$

où k symbolise le facteur « arbre » et varie de 1 à 25, p_{ijk} est la probabilité de pourriture, y_{ijk} est une variable d'état sanitaire, $\alpha_i\beta_j$ est l'effet parcelle élémentaire et c_{ijk} est l'effet arbre. μ , β_j et α_i sont des effets fixes, c_{ijk} a été considéré comme un effet aléatoire. La fonction de lien est le logit pour les données de pourcentage et le logarithme pour les données de comptage.

Les résidus des données de pourcentage étaient supposés suivre une distribution binomiale, alors que ceux des données de comptage étaient supposés suivre une distribution de Poisson.

Dans les cas du modèle linéaire généralisé et du modèle linéaire général mixte, extensions du modèle linéaire général à effets fixes quand les conditions de validité du modèle sont violées, les paramètres ont été estimés par la méthode du maximum de vraisemblance. La déviance a été utilisée pour tester l'ajustement du modèle. Elle suit une distribution du χ^2 avec $n-p$ degrés de liberté, où n est le nombre total d'observations (500 à Ngoulessaman et 400 à Elalè) et p le nombre de modalités indépendantes du facteur traitement (i.e. 1). Les nombres de degrés de liberté (*ddl*) sont donc théoriquement de 499 et 399 respectivement, à Ngoulessaman et à Elalè, respectivement. Les valeurs théoriques du χ^2 ne pouvant être lues directement sur les tables statistiques classiques (car *ddl* >>100), l'approximation suivante a été utilisée (Saporta, 1990) :

$$\left[\sqrt[3]{\left(\frac{\chi^2}{\nu} \right) + \frac{2}{9\nu}} - 1 \right] \sqrt{\frac{9\nu}{2}} \approx U$$

où χ^2/ν représente le seuil critique de la déviance, et $U=1,96$ et ν le nombre de degrés de liberté.

Les analyses statistiques ont été faites par variable et par année, à l'aide du logiciel SAS version 8.2 (SAS, 2001).

4.3 Résultats

Le tableau 4.1 résume les taux finaux de pourriture par site pendant les deux années d'observation. Le taux d'attaque dans les parcelles « sans » prélèvement des fruits malades a toujours été supérieur à celui observé dans les parcelles « avec » prélèvement des fruits malades ($p < 0,05$). La diminution relative de l'incidence de la maladie entre les deux traitements s'est montrée plus élevée (22-31 %) l'année où la pression infectieuse a été moins

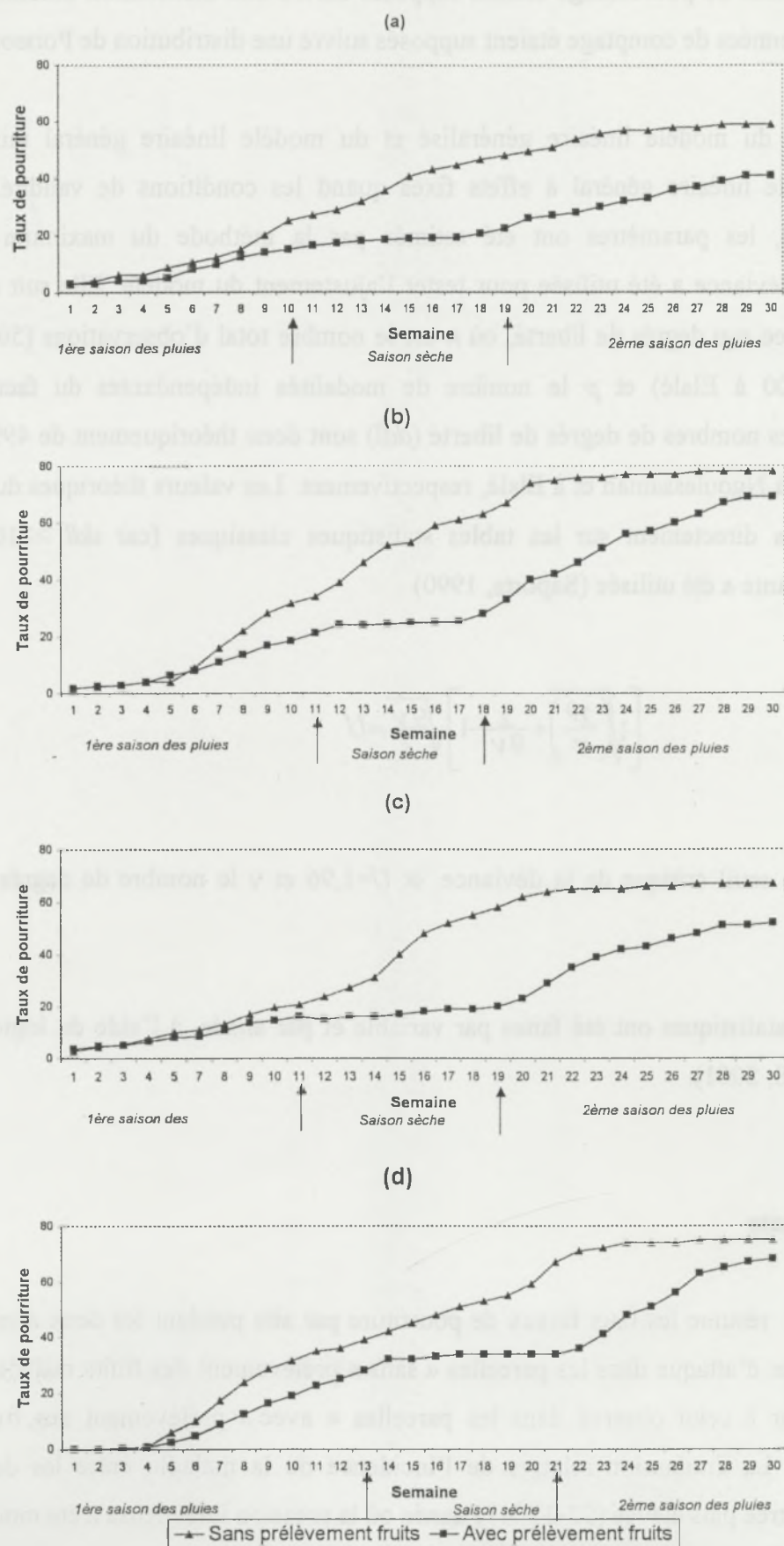


Figure 4.1 : Courbes cumulées de l'incidence de la pourriture brune observées à Ngoulessaman et à Elalè pendant les années 1998 et 1999

forte (1998). D'une année à l'autre dans un même site, les taux de pourriture ont également varié de façon significative ($p < 0,05$).

Tableau 4.1 : Incidence de la maladie (taux final de pourriture) mesurée dans les deux parcelles expérimentales. Les valeurs entre parenthèses représentent les intervalles de confiance au seuil de signification de 5 % ; pour une variable donnée, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $\alpha = 0.05$.

Site	Année	Traitement		Réduction relative (%)
		Sans prélèvement de fruits (%)	Avec prélèvement de fruits (%)	
Elalè	1998	67 (64 ; 69) a	52 (49 ; 54) b	22
	1999	75 (72 ; 77) a	68 (65 ; 70) b	9
Ngoulessaman	1998	59 (56 ; 61) a	41 (38 ; 43) b	31
	1999	78 (75 ; 80) a	69 (66 ; 71) b	11

Les courbes évolutives du taux cumulé de pourriture par site et par année sont représentées dans la figure 4.1. Pour un traitement donné (« avec » ou « sans » prélèvement des fruits malades), l'allure des courbes est restée inchangée chaque année. Quand les fruits atteints étaient prélevés des arbres, la courbe de progression avait une allure en double S (figure 4.1, carrés). Le premier plateau a coïncidé globalement avec la saison sèche dans chacun des sites. La progression de la maladie a repris avec le début de la seconde saison des pluies. En revanche quand les fruits malades restaient sur les arbres, la courbe de progression de la maladie avait une allure en simple S (figure 4.1, triangles). La progression de l'épidémie n'a pas été ralentie pendant la saison sèche. L'asymptote correspondant au taux final de pourriture a été atteinte 5 à 7 semaines avant celle observée dans la courbe de progression de la maladie des parcelles « avec » prélèvement des fruits malades.

Les résultats des analyses des données climatiques collectées en 1999 sont résumés dans le tableau 4.2. Il a plus plu à Ngoulessaman qu'à Elalè. Toutefois, les courbes de progression de la maladie dans les deux sites pendant cette année ont été presque identiques (figure 4.1, b et d). Globalement, les températures n'ont pas été significativement différentes

Tableau 4.2 : Variables climatiques mesurées dans les sites expérimentaux d'Elalé et Ngoulessaman en 1999. Les valeurs entre parenthèses représentent les intervalles de confiance au seuil de signification de 5 % ; pour une variable donnée, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $\alpha = 0.05$.

Variables	Sites	
	Elale	Ngoulessaman
Pluviométrie (mm)	1835 (1817 ; 1853) <i>a</i>	2304 (2286 ; 2322) <i>b</i>
Température minimum ambiante (°C)	22 (20.5 ; 23.5) <i>a</i>	21 (19.5 ; 22.5) <i>a</i>
Température maximum ambiante (°C)	33 (31.5 ; 34.5) <i>a</i>	30 (28.5 ; 31.5) <i>b</i>
Température moyenne ambiante (°C)	27.5 (26 ; 28) <i>a</i>	25.5 (24 ; 27) <i>a</i>
Temperature minimum sous-cacaoyère (°C)	20 (18.5 ; 21.5) <i>a</i>	19 (17.5 ; 20.5) <i>a</i>
Temperature maximum sous-cacaoyère (°C)	26 (24.5 ; 27.5) <i>a</i>	24 (22.5 ; 25.5) <i>a</i>
Temperature moyenne sous-cacaoyère (°C)	23 (21.5 ; 24.5) <i>a</i>	21.5 (20 ; 23) <i>a</i>

Tableau 4.3 : Ajustement de trois modèles aux données expérimentales: Modèle Linéaire Général, GLM ; Modèle Linéaire Généralisé, GENMOD ; Modèle Linéaire Généralisé Mixte, GLIMMIX.

Site	Variables	GLM		GENMOD		GLIMMIX	
		R ^{2a}	CV (%) ^b	Déviance par ddl ^c	théoretical χ^2	Déviance par ddl	χ^2 théorique
Ngoulessaman	Mûres-saines	0.14	164.54	8.84	1.26	1.19	1.26
	Chérelles	0.21	53.12	6.95	1.26	1.11	1.26
	Production potential	0.11	101.55	20.16	1.26	1.35	1.26
	Taux final de pourriture	0.06	49.65	7.72	1.26	0.94	1.25
Elale	Mûres-saines	0.11	119.84	5.57	1.27	1.23	1.27
	Chérelles	0.17	51.38	4.72	1.27	1.17	1.27
	Production potential	0.04	81.44	18.09	1.27	1.21	1.27
	Taux final de pourriture	0.09	39.91	6.45	1.27	0.98	1.25

^aR², Coefficient de détermination ; ^bCV, Coefficient de variation; ^cddl, degrés de liberté.

dans les deux sites. Les températures ambiantes ont toujours été plus élevées que les températures sous-cacaoyères.

Des analyses préliminaires ont été faites avec le modèle linéaire général. L'ajustement du modèle aux données expérimentales n'a pas été satisfaisant. En effet, les coefficients de détermination ont été très bas et les coefficients de variation très élevés (tableau 4.3). Les graphiques des résidus ont d'autre part montré la non-homogénéité de la variance et la non-normalité des résidus. Il y a une forte violation des conditions qui soutendent la validité du modèle linéaire général. Même après transformations angulaire (pour les variables « pourcentage ») et logarithmique (pour les données de comptage), ces paramètres ne se sont pas améliorés de façon significative. Il y a certes eu une baisse des coefficients de variation, mais les coefficients de détermination sont restés très bas, indiquant ainsi le faible pourcentage de variabilité expliqué par le modèle. De même, les transformations ont amélioré la normalité des résidus, mais l'hétéroscédasticité a persisté, rendant ainsi inadéquate l'utilisation du modèle linéaire général pour l'analyse des données.

Le modèle linéaire généralisé avec la procédure GENMOD a ensuite été envisagé. Les résultats ont été meilleurs que ceux obtenus avec la procédure GLM, car GENMOD tient compte de la distribution soit Binomiale, soit de Poisson suivie respectivement par les erreurs des données de pourcentage et de données de comptage. Mais ici, la déviance par degré de liberté a été très élevée ($>>1$) (tableau 4.3), ce qui est une preuve de surdispersion des données.

Finalement, pour traiter ces données dont les erreurs ont une distribution non-normale et pour tenir compte de l'existence des facteurs à effet fixe et à effet aléatoire, le modèle linéaire généralisé mixte a été utilisé. Les valeurs du rapport déviance – degrés de liberté sont toutes voisines de 1 et inférieures au χ^2 théorique (tableau 4.3), ce qui indique que le modèle est satisfaisant.

Les tests des effets fixes de quelques variables ont été présentés à titre d'exemple dans les tableaux 4.4 et 4.5. Globalement, l'effet traitement a été très significatif pour les variables Taux de pourriture hebdomadaire (*TPH*) et mûre-saine (*MS*), alors que cet essai n'a pas mis en évidence de différence significative entre les traitements pour la variable Production potentielle (*PP*).

Tableau 4.4 : Tests des effets fixes sur trois variables (*TPH* : Taux de pourriture hebdomadaire ; *MS* : Mûr-sain et *PP*: Production potentielle) à Elalè

Année		1998			1999			
Variable	Effet	ddl ^a	F value	Pr > F	Effet	ddl ^a	F value	Pr > F
<i>TPH</i>	Bloc	7 / 374	7.37	<.0001	Bloc	7 / 372	5.13	<.0001
	Traitement	1 / 374	28.37	<.0001	Traitement	1 / 372	103.21	<.0001
	Bloc *				Bloc *			
	Traitement	7 / 374	2.07	0.0462	Traitement	7 / 372	2.02	0.0473
<i>MS</i>	Bloc	7 / 374	4.02	0.0003	Bloc	7 / 372	5.34	<.0001
	Traitement	1 / 374	44.50	<.0001	Traitement	1 / 372	79.57	<.0001
	Bloc *				Bloc *			
	Traitement	7 / 374	2.98	0.0382	Traitement	7 / 372	2.11	0.0426
<i>PP</i>	Bloc	7 / 374	5.01	<.0001	Bloc	7 / 372	1.74	0.0982
	Traitement	1 / 374	0.03	0.8522	Traitement	1 / 372	0.63	0.4291
	Bloc *				Bloc *			
	Traitement	7 / 374	1.27	0.2624	Traitement	7 / 372	2.00	0.0538

^a *ddl*, degrés de liberté (*ddl* du numérateur / *ddl* du dénominateur)

Tableau 4.5 : Tests des effets fixes sur trois variables (*TPH* : Taux de pourriture hebdomadaire ; *MS* : Mûr-sain et *PP*: Production potentielle) à Ngoulessaman

Année		1998			1999			
Variable	Effet	df ^a	F value	Pr > F	Effet	df ^a	F value	Pr > F
<i>TPH</i>	Bloc	9 / 437	4.93	<.0001	Bloc	9 / 449	5.30	<.0001
	Traitement	1 / 437	25.55	<.0001	Traitement	1 / 449	130.78	<.0001
	Bloc *				Bloc *			
	Traitement	9 / 437	1.62	0.1074	Traitement	9 / 449	1.24	0.0487
<i>MS</i>	Bloc	9 / 437	48.92	<0.0001	Bloc	9 / 449	4.46	<.0001
	Traitement	1 / 437	7.01	0.0084	Traitement	1 / 449	4.64	0.0317
	Bloc *				Bloc *			
	Traitement	9 / 437	3.12	0.0361	Traitement	9 / 449	1.36	0.2048
<i>PP</i>	Bloc	9 / 437	5.80	<.0001	Bloc	9 / 449	9.90	0.0982
	Traitement	1 / 437	2.75	0.0982	Traitement	1 / 449	0.94	0.4291
	Bloc *				Bloc *			
	Traitement	9 / 437	1.08	0.3755	Traitement	9 / 449	1.54	0.0538

^a *ddl*, degrés de liberté (*ddl* du numérateur / *ddl* du dénominateur)

Les moyennes estimées par la méthode du maximum de vraisemblance sont résumées dans le tableau 4.6.

De façon générale, le nombre de fruits *wiltés* a été très élevé dans les deux sites. En 1998 à Ngoulessaman, ce nombre a été significativement plus élevé dans les parcelles où les fruits malades avaient été prélevés des arbres. En 1999, ce phénomène s'est plutôt observé à Elalè seulement.

Globalement, le nombre de fruits rongés et ceux atteints par d'autres maladies que la pourriture brune a été très bas par rapport au nombre de fruits pourris ou wiltés.

Le développement des nouvelles cabosses est évalué par le nombre de chérelles. Le flux d'apparition des chérelles est significativement différent ($p < 0.05$) entre les deux traitements (tableau 4.6). La récolte sanitaire provoque donc une augmentation du nombre de fruits noués. Quant à la production potentielle, cette étude n'a pas permis de mettre en évidence une différence significative entre les deux traitements au seuil $\alpha = 0.05$, bien que le nombre total de cabosses soit plus élevé dans les parcelles avec prélèvement des fruits que dans celles sans prélèvement des fruits atteints.

Chaque année et dans les deux sites, le nombre de cabosses mûres-saines a été relativement bas, et significativement plus élevé dans les parcelles « avec » prélèvement des fruits malades que dans celles où cette opération n'a pas été effectuée.

4.4. Discussion

Ces travaux ont permis de quantifier l'impact de la récolte sanitaire sur le taux de pourriture brune des cabosses du cacaoyer. Cette pratique permet en effet une diminution relative du taux de pourriture de l'ordre de 9-11 % à 22-31 % en fonction des années. Cette valeur est une indication de la contribution de l'inoculum secondaire venant des fruits contaminés dans le développement de la maladie. En effet, la progression de l'épidémie peut être due à divers mécanismes : le contact direct entre fruits voisins sains et malades, la dispersion des entités infectieuses par les eaux de ruissellement le long de l'arbre ou encore par le phénomène de splashing (Muller, 1974b ; Gregory et *al.*, 1984 ; Ristaino et Gumpertz, 2000). La dispersion par les eaux se passe donc essentiellement en saison des pluies. Toutefois, elle peut aussi se produire en saison sèche, quand les rares épisodes pluvieux

Tableau 4.6: Nombre moyen de fruits par arbre dans les états sanitaires. (*PP*, Production Potentielle). Pour une variable donnée dans le même site, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0.05$; les valeurs entre parenthèses représentent les intervalles de confiance de la moyenne

Year	Variable	Site			
		Ngoulessaman		Elale	
		Sans prélèvement fruits malades	Avec prélèvement fruits malades	Sans prélèvement fruits malades	Avec prélèvement fruits malades
1998	Pourris	13.6 (11.9 ; 15.1)a	9.7 (8.0 ; 11.2) b	17.9 (16.2 ; 19.4) a	13.9 (12.2 ; 15.4)b
	Wiltés	30.6 (28.3 ; 32.5)a	37.2 (34.9 ; 39.1)b	33.4(31.1 ; 35.3) a	32.2(29.9 ; 34.1) a
	Rongés	0.39 (0.36 ; 0.41)a	0.56 (0.53 ; 0.58)b	0.43 (0.40 ; 0.45) a	0.72(0.69 ; 0.74) b
	Autres maladies	0.31 (0.28 ; 0.33)a	0.47 (0.44 ; 0.49)b	0.18(0.15 ; 0.20) a	0.22(0.19 ; 0.24) a
	Chérelles	15.1 (13.2 ; 16.8)a	19.2 (17.3 ; 20.9)b	14.9 (13.0 ; 16.6) a	20.4(18.5 ; 22.1) b
	<i>PP.</i>	23.1(20.3 ; 25.4) a	24.5 (21.7 ; 25.1)a	26.7(24.9 ; 28.3) a	27.0(25.2 ; 28.6) a
	Mûres saines	2.8 (1.5 ; 3.9) a	6.1 (4.8 ; 7.1) b	3.8 (2.9 ; 4.5) a	5.8 (4.7 ; 7.2) b
1999	Pourris	33.2 (31.1 ; 35.0)a	27.6 (25.5 ; 29.4)b	34.6 (32.5 ; 36.4)a	30.2 (28.1 ; 32.0)b
	Wiltés	48.1 (45.5 ; 50.4)a	44.3 (41.7 ; 46.6)a	38.2 (35.0 ; 40.5) a	51.2 (48.6 ; 53.5)b
	Rongés	0.63 (0.59 ; 0.66)a	1.73 (1.69 ; 1.76)b	0.89 (0.85 ; 0.92) a	0.95 (0.91 ; 0.98)a
	Autres maladies	0.44 (0.40 ; 0.47)a	0.69 (0.65 ; 0.72)b	0.53 (0.49 ; 0.56) a	0.72 (0.68 ; 0.75)b
	Chérelles	18.5 (16.4 ; 20.3)a	23.2 (21.1 ; 25.0)b	20.6 (18.5 ; 21.4) a	27.0 (24.9 ; 28.8)b
	<i>PP.</i>	42.1 (39.8 ; 43.9)a	40.2 (37.9 ; 42.1)a	45.3 (43.1 ; 47.2)a	44.1 (41.8 ; 45.9)a
	Mûres saines	1.9 (1.6 ; 2.1) a	6.5 (4.9 ; 7.4) b	3.3 (3.2 ; 4.2) a	5.6 (3.6 ; 6.8) b

provoquent une expansion modérée de l'épidémie, à condition que soit présente une source active d'inoculum secondaire.

Le prélèvement des fruits malades supprime donc une source importante d'inoculum secondaire, ce qui explique le premier plateau observé sur les courbes de progression de la maladie (figure 4.1). Toutefois, le redémarrage de la progression de la maladie dès le début de la seconde saison des pluies laisse supposer la présence d'autres sources d'inoculum, qui ont besoin d'une certaine quantité d'eau pour déclencher l'épidémie. Outre le sol, les autres sources d'inoculum sont les coussinets floraux, les feuilles, les écorces de l'arbre... (Okaisabor, 1970).

Ces résultats ne concordent pas tout à fait avec ceux obtenus au Pérou par Soberanis et al. (1999), qui ont montré que la récolte sanitaire faite de façon hebdomadaire diminuait de 35 à 66 % le taux de pourriture brune des cabosses du cacaoyer. La différence d'amplitude de l'impact de la récolte sanitaire sur le taux de pourriture entre le Pérou et le Cameroun est probablement due à l'agent pathogène qui sévit dans les deux pays. Au Pérou, l'agent pathogène prédominant qui provoque la pourriture brune des fruits est le *P. palmivora*, qui est moins agressif que le *P. megakarya* (Brasier et Griffin, 1979) qui sévit au Cameroun.

Cette étude a également permis de constater que le flux d'apparition des fruits est plus grand dans les parcelles où est pratiquée la récolte sanitaire. Cette pratique agronomique induit la production de nouveaux fruits par la suppression des fruits malades qui peuvent probablement être considérés comme des consommateurs d'énergie. En revanche, il n'a pas été mis en évidence lors de cette étude une différence significative (au seuil de 0,05) de production potentielle entre les deux traitements, bien que dans les parcelles avec récolte sanitaire, on ait observé un nombre plus élevé du total des cabosses. Ceci peut s'expliquer par le taux élevé de *wilt*, ce dessèchement précoce de nature physiologique qui concerne en général les chérelles et les jeunes cabosses.

Au cours de cette étude, différentes méthodes d'analyses statistiques ont été testées. L'utilisation du modèle linéaire général mixte s'est avérée plus adéquate. Cette méthode innovante, utilisée avec la macro GLIMMIX (Littel et al., 1996), a l'avantage de tenir compte à la fois des effets fixe (bloc et traitement) et aléatoire (arbre) des facteurs, et de la distribution des résidus des variables aléatoires. La combinaison des effets fixes et aléatoires est courante dans les dispositifs expérimentaux utilisés dans la recherche en général. Ce

modèle innovant, qui a donné de meilleurs résultats que ceux obtenus avec les procédures fréquemment utilisées (GLM et GENMOD de SAS), pourrait être appliqué à une très large gamme d'études expérimentales.

Le prélèvement des fruits malades pratiqué lors de cette étude, n'est pas toujours identique à la pratique paysanne. Déjà, le cacaoculteur ne la fait pas systématiquement toutes les semaines. Quand il la fait, les fruits momifiés retirés de l'arbre ne sont pas toujours mis hors de la parcelle. Ainsi, pour que cette diminution du taux de pourriture et un accroissement relatif de la production soient effectifs, il faudrait que l'agriculteur fasse un prélèvement de fruits malades plus régulier que celui actuellement pratiqué. Le lui demander implique un travail supplémentaire. Une étude économique s'impose donc pour savoir si les bénéfices générés par une récolte sanitaire bien faite sont substantiels par rapport aux coûts induits supplémentaires. L'élaboration d'un modèle de la dynamique du *Phytophthora megakarya* similaire à celui développé pour *Moniliophthora roreri*, un autre agent pathogène provoquant des maladies sur cacaoyer (Leach et *al.*, 2002), devrait permettre d'évaluer les revenus nets des diverses stratégies de gestion des cacaoyères par les agriculteurs camerounais.

Des études antérieures ont montré que les pertes dues à la pourriture brune des cabosses du cacaoyer au Cameroun sont de l'ordre de 50 à 60 % (Despréaux et *al.*, 1989). Le prélèvement des fruits malades des arbres, bien que diminuant de façon significative le taux de pourriture, ne suffit pas à lui seul pour éradiquer le fléau. Cette pratique pourrait venir en complément à d'autres méthodes de lutte, telles que l'installation du matériel végétal plus résistant, ou l'utilisation raisonnée des fongicides, dans la perspective de mettre en place un véritable système de lutte intégrée contre la maladie.

CHAPITRE 5 : DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALES

Au Cameroun, la pourriture brune des cabosses du cacaoyer due à *Phytophthora* spp. est responsable d'importantes chutes de production. Omniprésente dans l'ensemble des bassins de production de cacao et combattue essentiellement à l'aide de nombreux traitements fongicides, cette maladie est une contrainte phytosanitaire majeure dans le pays tant sur le plan économique que social et environnemental. Sur le plan économique, cette lutte, telle que théoriquement recommandée, est onéreuse et incompatible avec les revenus des petits exploitants. Sur le plan social, il y a une exposition importante de l'opérateur des traitements fongicides (photo 5.1), associée à un travail pénible (transport de grandes quantités d'eau). Sur le plan environnemental enfin, il y a fort à craindre une rupture des équilibres naturels, le développement des résistances des agents pathogènes aux fongicides, la présence des résidus dans les fruits directement comestibles dont les arbres parsèment les cacaoyères (manguiers, safoutiers, kolatiers, orangers...) et la pollution de l'air et des eaux superficielles ou souterraines. Pour atténuer ces problèmes, il est nécessaire de passer d'une lutte chimique d'assurance à une lutte raisonnée, dont le principe de base est de mieux traiter, c'est-à-dire adapter les interventions aux risques réels. L'étape la plus importante est sans nul doute celle de la prise de décision des traitements, notamment à travers la connaissance des seuils d'intervention dans les différentes zones agro-écologiques. Les dates traditionnellement recommandées ne sont pas toujours appropriées ; selon les zones, il arrive que les plantations soient déjà touchées par la maladie ou au contraire exemptes de tout symptôme de pourriture brune. L'épidémiologie de la maladie est très mal connue ; elle est pourtant nécessaire à la définition de stratégies de lutte adaptées.

C'est avec le souci d'optimiser les interventions dans les différentes zones production du cacao que cette étude a été menée. C'est une contribution à la mise à disposition d'outils innovants, permettant un développement de la lutte raisonnée contre la pourriture brune des cabosses du cacaoyer au Cameroun.

Ce travail visait trois objectifs :

- Identifier de façon précise les facteurs agro-climatiques qui favorisent l'expression de la pourriture brune.
- Etudier le développement spatio-temporel de la maladie.



Photo 5.1 : Agriculteur appliquant un traitement chimique dans une parcelle de cacaoyers à Mbankomo

- Evaluer l'impact de la récolte sanitaire sur la production et le taux de pourriture des cabosses du cacaoyer.

Nous récapitulerons ci-dessous les résultats principaux liés à chacun de ces objectifs avant d'analyser leur conséquences épidémiologiques et pratiques.

5.1. Récapitulatif des principaux résultats

5.1.1. Relation dynamique maladie – facteurs climatiques

Les analyses de corrélations croisées et de régression multiple ont montré que l'incidence de la maladie s'expliquait essentiellement par la pluviométrie (cf. chapitre 2). Les températures, relativement constantes le long de l'année, n'ont pas pu être intégrées dans les différents modèles. Ces modèles ont été trop variables d'une année à l'autre dans le même site. Il y a toujours eu un décalage d'une à deux semaines entre les épisodes pluvieux et l'expression de la maladie.

Cette étude a également montré qu'il ne fallait pas forcément de très « fortes » pluies pour déclencher la maladie. Des pluies de faible intensité tombées pendant plusieurs jours pouvaient tout aussi bien créer des conditions favorables au développement de l'épidémie.

Des calculs faits à partir des modèles ajustés aux données expérimentales, il ressort qu'en l'an 2000 par exemple, pour atteindre un taux de pourriture hebdomadaire de 1 %, il a fallu des hauteurs de précipitations de 59 mm, 34 mm et 27 mm à Mbankomo, Goura et Barombi-Kang, respectivement. Ces grandes différences peuvent s'expliquer par le nombre moyen de jours de pluies et leur répartition par semaine et par l'agressivité des souches de l'agent pathogène. En effet, pendant la période de fructification du cacaoyer, il pleut en moyenne, par semaine, cinq jours à Barombi-Kang, et trois jours à Mbankomo et à Goura. A Barombi-Kang, les pluies régulières et de forte intensité créeraient donc des conditions telles que de petites hauteurs puissent déclencher la maladie. La différence entre Goura et Mbankomo porte sur la régularité des pluies. Il pleut certes en moyenne le même nombre de fois par semaine dans ces deux localités, mais les épisodes pluvieux sont plus espacés à Mbankomo qu'à Goura où les pluies sont en plus de faible intensité. D'autre part, des études en cours (Nyassé ; Ducamp ; communications personnelles) montreraient des différences de niveaux d'agressivité des souches de *Phytophthora megakarya* dans ces diverses localités.

5.1.2. Dynamique spatio-temporelle de la maladie

Les analyses spatio-temporelles ont été effectuées à trois échelles : le fruit, l'arbre et la parcelle (cf. chapitre 3).

A l'échelle du fruit, cette étude a montré que les symptômes de la pourriture brune des fruits pouvaient se retrouver aussi bien en zone proximale que médiane ou distale du fruit. Les proportions sont en moyenne de 48 %, 26 % et 28 % de présence des lésions dans les trois zones du fruit, respectivement. Contrairement à l'idée couramment répandue selon laquelle les premiers symptômes de pourriture apparaissent préférentiellement aux extrémités des fruits, nous constatons qu'il y a certes plus de lésions en zone proximale, mais qu'il en existe autant en zone médiane qu'en zone distale.

A l'échelle de l'arbre, les premiers fruits malades ont été observés indifféremment dans tous les étages de l'arbre. Néanmoins, une tendance ascensionnelle de l'évolution de la maladie a été observée à Mbankomo et à Goura, phénomène moins apparent à Barombi-Kang, où aucune tendance particulière n'est apparue.

A l'échelle de la parcelle, les courbes évolutives de la maladie ont présenté une allure générale en simple S en zone à pluviométrie monodale (zone IV) et en double S en zone de pluviométrie bimodale (zone V). Ces résultats confirment le rôle joué par la répartition des pluies dans l'expression de la maladie.

Les seuils épidémiques observés ont été de 5 % à Mbankomo et Barombi-Kang, 1 % à Goura. Dans chacun des sites, ces seuils ont été atteints à différentes dates chaque année. Quand ils étaient atteints, 15-30 % d'arbres seulement portaient des fruits malades. Des analyses spatiales ont montré une structure apparente dans les parcelles de Goura et de Barombi-Kang, structure qui n'a pas été observée à Mbankomo. La présence d'une telle structure dans certaines parcelles indique à l'existence de foyers d'infection de la maladie.

5.1.3. Impact du prélèvement des fruits malades

Les deux localités où cet essai a été mené se situent en zone de pluviométrie bimodale (cf. chapitre 4). Lorsque les fruits malades sont prélevés des arbres de façon hebdomadaire, la

courbe évolutive de la maladie y est en double S. En l'absence de prélèvement de fruits malades dans la parcelle, c'est plutôt une courbe en simple S qui est observée. En effet, même pendant la saison sèche qui sépare les deux saisons humides, les rares pluies qui tombent suffisent à faire progresser la maladie, du fait de la présence d'un inoculum secondaire abondant constitué par les fruits malades laissés sur les arbres.

Des analyses statistiques innovantes basées sur le modèle linéaire généralisé mixte ont permis de montrer une différence significative ($p < 5 \%$) du taux d'attaque entre une parcelle où le prélèvement des fruits malades a été effectué et une parcelle n'ayant subi aucune mesure prophylactique. L'impact du prélèvement des fruits malades a varié suivant les années. La première année d'étude (1998) où la pression infectieuse n'était pas très élevée, il y a eu une diminution relative du taux d'attaque de 22-31 %. La seconde année (1999), l'incidence de la maladie a été plus forte que l'année précédente et la diminution relative du taux d'attaque a été de 9-11 %.

5.2. Conséquences épidémiologiques

La connaissance de l'épidémiologie d'une maladie permet de mettre plus facilement en œuvre des stratégies pour lutter contre elle. Sur des pathosystèmes tels que le mildiou de la pomme de terre, les rouilles des céréales, la tavelure du pommier ou la mosaïque du manioc, l'accumulation de connaissances épidémiologiques a permis de proposer et de valider des méthodes de lutte (Jones, 1998).

En revanche, les travaux menés dans le cadre de la lutte contre la pourriture brune des cabosses du cacaoyer se sont souvent heurtés à une connaissance incomplète de l'épidémiologie de la maladie (Muller, 1972 ; Gregory, 1974). La présente étude constitue donc une avancée importante vers une meilleure compréhension de l'épidémiologie de la maladie dans les trois domaines suivants :

- mécanismes de dispersion
- relations quantitatives entre la maladie et les variables climatiques
- progression spatio-temporelle de l'épidémie.

5.2.1. Mécanismes de dispersion de la maladie

Les mécanismes de dispersion des maladies causées par des *Phytophthora* ont été classés en cinq catégories (Ristaino et Gumpertz, 2000) :

I : *Dispersion dans le sol*, assurant une progression lente et localisée de l'épidémie. La présence d'un inoculum viable de *P. palmivora* dans le sol d'une cacaoyère a été rapportée au Nigéria (Onesirosan, 1971). Nos expérimentations ne permettent pas d'apporter d'élément factuel nouveau concernant ce mécanisme, dont l'évaluation sera nécessaire à la prise en compte de la récurrence annuelle des épidémies au sein d'une même cacaoyère.

II : *Dispersion des zoospores par les eaux de surface*. Ce mécanisme affecte surtout les plantes dont les organes sensibles sont situés très près du sol ou en contact direct avec l'eau porteuse d'inoculum (tomate [Neher et Duniway, 1992] ; poivron [Ristaino *et al.*, 1993] ; courge [Café-Filho et Duniway, 1995]), et ne semble pas être significatif dans le cas du cacaoyer.

III : *Splashing à partir du sol*, entraînant la formation de foyers à expansion lente et relativement isotrope. Ce mécanisme semble le plus vraisemblable pour expliquer les dynamiques observées au sein de nos parcelles expérimentales, les contaminations primaires paraissant effectivement être d'origine tellurique. Ce type de dispersion a été rapporté dans le cas d'autres arbres, tels le pommier et l'hévéa. (Erwin et Ribeiro, 1996). Ristaino et Gumpertz (2000) n'abordent pas dans cette section les contaminations secondaires issues du splashing à partir de lésions sporulantes. Ce mécanisme est sans doute minoritaire chez la plupart des mildious des plantes annuelles, pour lesquelles les cycles secondaires relèvent de la dissémination aérienne (mécanisme IV), mais paraît être le mécanisme essentiel du développement polycyclique de la maladie au sein des cacaoyères. Ceci est amplement démontré par la comparaison des dynamiques entre zones à pluviométrie unimodale et bimodale et entre cacaoyères conduites avec ou sans prélèvement des cabosses contaminées. Il faut aussi noter que l'importance de la dissémination ombrophile a été systématiquement sous-évaluée chez de nombreux parasites, par exemple les rouilles des céréales (Sache, 2000)

IV : *Dispersion aérienne à partir de lésions sporulantes*, assurant une dispersion à longue distance et la formation de foyers à croissance rapide et forte coalescence. Les

cacaoyères se caractérisent par un couvert relativement fermé au sein duquel le vent pénètre peu. Bien que la vitesse du vent n'ait pas été mesurée lors de nos expérimentations, l'absence de généralisation rapide de la maladie au sein des cacaoyères et la relation très nette entre les épisodes pluvieux et la dynamique temporelle de l'épidémie laissent penser que la dispersion aérienne du parasite est peu importante. L'impact d'une éventuelle dispersion à très longue distance, rare mais efficace pour propager la maladie de cacaoyère à cacaoyère, n'a pas été étudié dans le cadre de ce travail.

V : *Dispersion par l'activité humaine et les invertébrés*, assurant l'apparition de foyers à diverses distances. Les interventions phytosanitaires contribuent certainement à la dispersion de l'inoculum, dans une mesure difficile à évaluer expérimentalement. En revanche, divers insectes impliqués dans la dispersion de *P. palmivora* ont été identifiés au Ghana et en Côte d'Ivoire (Evans, 1973a ; Babacauh, 1982). Parmi eux, des fourmis semblent contribuer de façon significative à la dispersion verticale de la maladie. Leur rôle dans les dynamiques rapportées dans ce travail n'a pas été étudié mais ne peut être exclu. Ce mécanisme de dispersion pourrait agir de concert avec le mécanisme III pour assurer la contamination initiale des fruits.

Une comparaison plus approfondie des mécanismes de dispersion a été effectuée dans le cadre des mildious affectant trois espèces de Solanacées (*P. capsici* / poivron, *P. infestans* / pomme de terre, *Peronospora tabacina* / tabac) montre que des parasites taxonomiquement et biologiquement voisins peuvent avoir des mécanismes de dispersion dans le temps et l'espace très contrastés (Campbell, 1999). La pourriture des cabosses du cacaoyer possède certains points communs avec ces trois maladies, mais les particularités de ce pathosystème (plante pérenne, milieu tropical, dissémination majoritairement ombrophile) le rendent difficilement comparable à elles. Les aspects spécifiques de « l'ontogénie épidémiologique » (Campbell, 1999) devront donc être abordés expérimentalement dans le futur.

5.2.2. Relations quantitatives entre la maladie et les variables climatiques

Les variables climatiques dont nous voulions établir les relations avec l'incidence de la maladie sont les températures minimales, maximales et moyennes (ambiantes et sous-cacaoyère), l'amplitude thermique et la pluviométrie. Au Cameroun, en effet, entre les mois d'avril et de novembre de chaque année (période de fructification du cacaoyer), les

températures minimales enregistrées ont varié globalement dans les différents sites de 17 à 22 °C. Pendant cette même période les températures moyennes variaient globalement de 21 à 25 °C, et l'amplitude moyenne de 4 à 7 °C. Les conditions de températures ne constituent donc pas, en milieu paysan, un facteur limitant pour le développement du *Phytophthora megakarya* dont les températures minima de croissance se situent à 10-11 °C et les températures optimum à 24 -26 °C (Brasier et Griffin, 1979). En présence des fruits sur les arbres, il ne manque que l'eau pour activer les foyers d'inoculum primaire. Cette eau, par les phénomènes de splashing et de ruissellement le long de l'arbre, sera à l'origine de la dispersion des entités infectieuses puis de la contamination des fruits sains. Ce schéma a été exprimé par des modèles empiriques, descriptifs, ajustés aux données expérimentales. Seule la variable « pluviométrie » a effectivement pu y être intégrée, les coefficients de régression variant d'année en année. Ces modèles se sont montrés trop variables d'une année à l'autre au sein du même site pour qu'il soit possible de proposer, au stade actuel de l'étude, un modèle global par zone agro-écologique.

Le rôle de l'inoculum secondaire constitué par la présence des fruits malades a pu être mis en exergue, dans un essai où des traitements « avec » et « sans » prélèvement des fruits malades des arbres étaient mis en comparaison. Pendant la saison sèche (rareté des pluies), l'évolution de la maladie a pratiquement stagné dans les parcelles « avec » prélèvement des fruits malades, alors que pendant cette même période, l'épidémie a continué à progresser dans les parcelles « sans » prélèvement des fruits atteints. L'eau constitue donc la principale voie de dissémination des organes infectieux de l'agent pathogène. Sa présence permet à l'inoculum primaire de déclencher la maladie, et l'inoculum secondaire en assure la progression. Ceci confirme la nature polycyclique de la pourriture brune des cabosses due à *P. megakarya*.

Parmi les variables climatiques non prises en compte dans cette étude figure la *durée d'humectation*. Cette variable est difficile à mesurer expérimentalement ou à évaluer par le biais de la simulation (Huber et Gillespie, 1992). Une évaluation indirecte des périodes d'humectation à partir de l'humidité relative et de la température sert à la prédiction de la sévérité du mildiou de la pomme de terre par le modèle Blitecast (Krause et Massie., 1975). Les expérimentations de laboratoire effectuées dans le cadre de ce travail ont montré que la durée d'humectation n'est pas homogène sur toute la surface d'une cabosse et peut également dépendre du stade de développement du fruit. En situation réelle, la durée d'humectation est vraisemblablement encore plus hétérogène, notamment à cause de la présence d'arbres

d'ombrage. L'utilisation en pratique de la durée d'humectation comme variable prédictrice du développement de la maladie semble donc très problématique.

5.2.3. Progression spatio-temporelle de la maladie

La réalisation des cartes de répartition de la maladie et les analyses spatio-temporelles ont permis de mieux comprendre la progression de l'épidémie au sein des parcelles observées. Pendant les trois années d'observations, la maladie a presque systématiquement commencé au même endroit pour une parcelle donnée. Ceci indique une dynamique très locale et récurrente de l'épidémie. L'inoculum primaire est donc présent dans la parcelle, localisé certainement à certains endroits tels que le sol (Onesirosan, 1971), les coussinets floraux ou les branches, mais peut-être aussi dans d'autres arbres fruitiers ou d'ombrage présents dans la cacaoyère.

La plupart des études de progression spatio-temporelle d'épidémies ont été effectuées sur des pathosystèmes plus simples que la pourriture des cabosses du cacaoyer. En nous restreignant au cas des mildioux, les maladies étudiées affectent des couverts réguliers, ouverts, et de taille réduite, comme par exemple le mildiou de la pomme de terre (Minogue et Fry, 1983), le mildiou du chou (Stein *et al.*, 1994) et le mildiou de la laitue (Wu *et al.*, 2001). Une cacaoyère se caractérise par une très forte hétérogénéité spatiale liée à la présence d'autres arbres et aux vides laissés par les arbres morts non remplacés. La répartition des fruits au sein des arbres est elle-même hétérogène. Les travaux réalisés ici montrent que la répartition spatiale de la maladie est hétérogène à diverses échelles : toutes les parties du fruit ne sont pas colonisées de façon identique et la dynamique verticale de la maladie au sein d'un arbre peut être ascendante ou descendante. Dans plusieurs parcelles, les semi-variogrammes construits sur l'ensemble de la parcelle ont d'une part présenté une structure particulière et d'autre part révélé que la portée n'excédait pas 7,5-9 mètres. Ces résultats sont une indication non seulement d'une dynamique focale dans ces parcelles, mais aussi d'une dispersion à très courte distance des épidémies dues à *P. megakarya*. Ces résultats sont en accord avec les mécanismes potentiels de dispersion décrits dans le paragraphe précédent. Le seul exemple comparable est la maladie de la pourriture de la tige étudiée sur les palmiers à huile au Surinam. Au sein de palmeraies hétérogènes, la dynamique des foyers est beaucoup plus rapide et directionnelle que celle observée dans les cacaoyères. Ceci s'explique vraisemblablement par une dispersion essentiellement anémophile (Van de Lande, 1993 ; Van de Lande et Zadoks, 1999)

Etablir des relations entre les processus spatiaux intervenant à différentes échelles sera nécessaire pour mieux comprendre la dynamique spatio-temporelle des épidémies. Ce problème se pose également dans le cas de pathosystèmes très différents, tels les rouilles des céréales (I. Sache, *communication personnelle*). L'influence des changements d'échelle sur les dynamiques de populations a été abordée essentiellement de façon théorique aussi bien en épidémiologie végétale (Shaw, 1994; Zadoks et Van den Bosch, 1994) que dans le cadre plus large de l'étude des invasions biologiques (Shigesada *et al.*, 1995).

5.3. Conséquences pratiques

Les résultats obtenus lors de cette étude ont des conséquences pratiques importantes sur les dates que sur le lieu et le nombre de traitements fongicides.

5.3.1. Date du premier traitement fongicide

Au Cameroun, les firmes phytosanitaires recommandent de commencer le traitement fongicide dès que les chérelles ont 2-3 cm (pendant la saison des pluies). Elles proposent de traiter si possible avant l'apparition des premiers symptômes de la pourriture brune, et de continuer à intervalle de trois semaines entre chaque traitement (quand un fongicide pénétrant est utilisé) (La Voix du Paysan, 2001). Il est évident qu'une telle pratique aboutit à un nombre trop élevé de traitements en fin de campagne.

La date du premier traitement fongicide est cependant primordiale. Ce traitement ne doit être fait ni trop tôt pour ne pas avoir en fin de campagne un nombre trop élevé d'applications, ni trop tard pour ne pas risquer de voir toute la parcelle envahie de pourriture brune.

Les résultats obtenus lors de cette étude ont montré qu'il n'est pas nécessaire de commencer la lutte chimique dès le stade « chérelle », quand ces jeunes fruits ne sont pas encore atteints par la maladie. Dès l'apparition des premiers symptômes de la pourriture brune, le prélèvement hebdomadaire des fruits malades suffirait à contrôler l'épidémie. En réduisant ainsi la proportion des spores capables de provoquer de nouvelles infections (inoculum secondaire), le début de la phase exponentielle de l'épidémie est considérablement retardé.

Avec l'augmentation des épisodes pluvieux, la pression infectieuse devient relativement importante à un certain moment, rendant inévitable l'intervention par des traitements chimiques. Au Cameroun, le régime des pluies varie énormément d'une localité à l'autre et même d'une année à l'autre au sein de la même localité, d'où les dates d'apparition différentes des premiers symptômes de la maladie. Il n'est donc pas évident de proposer une date fixe de début de traitements fongicides dans les différentes localités. La détermination de la date du premier traitement fongicide sera basée sur la modélisation et la détection des foyers primaires. La question évidente qui se poserait est celle de savoir comment détecter les foyers primaires d'infection.

En nous basant sur la production potentielle, le seuil épidémique et la portée des *semi-variogrammes* dans les diverses parcelles pendant les trois années d'observations, nous avons défini différemment ces foyers d'infection en fonction des sites :

- à Mbankomo, une zone de la parcelle sera considérée comme foyer si on y décompte plus cinq fruits malades sur quatre arbres voisins (cf § 3.2.3.1) ;
- à Barombi-Kang, on parlera de foyer si trois arbres voisins portent plus de cinq fruits malades ;
- à Goura enfin, une zone sera définie comme un foyer si on y retrouve plus de deux fruits malades portés par cinq arbres voisins.

Cette étude ayant montré que certains arbres restent indemnes de maladie jusqu'en fin de campagne, il ne nous paraît donc pas judicieux de commencer à traiter toute la parcelle dès l'apparition des premiers fruits, et de renouveler systématiquement ces applications à des intervalles de temps définis, comme le préconisent certaines firmes phytosanitaires.

5.3.2. Lieu et nombre de traitements fongicides

Au Cameroun, l'IRAD recommande, sur l'ensemble de la campagne cacaoyère, huit à douze traitements fongicides en fonction de la zone agro-écologique (zone à régime pluviométrique monomodal ou bimodal) et du type de produit utilisé (fongicide de contact ou pénétrant). Quand ces traitements sont faits par pulvérisation, ils doivent être espacés les uns des autres de deux à trois semaines (cf. tableau 1.3) et l'Institut propose de les commencer dès

le début de la première saison des pluies. Pour réduire les risques d'apparition de résistance, il est également recommandé d'alterner au cours de la campagne l'application des fongicides de contact avec des fongicides pénétrants. Ces recommandations phytosanitaires, bien qu'efficaces, sont cependant difficiles à mettre en œuvre, notamment à cause des contraintes techniques et économiques. Elles impliquent en effet souvent, l'utilisation d'appareils de traitements sophistiqués (atomiseurs, thermonébulisateurs) et la disponibilité des produits phytosanitaires.

Berry et Tafforeau (1991) ont montré qu'une diminution de la charge de travail était possible avec la mise en place d'un protocole d'intervention à quatre applications de fongicides par an. Toutefois, cette technique de lutte s'avère difficile à mettre en œuvre en raison du coût excessif des intrants et des appareils de traitements et de la superficie réduite de certaines parcelles (rendant un tel traitement non rentable).

Cette étude a montré dans certaines parcelles, l'agrégation des arbres portant des fruits malades, indiquant ainsi l'existence des foyers primaires d'infection. Dans les cacaoyères où ces foyers sont détectés, les traitements fongicides pourraient se limiter à ces zones, diminuant ainsi considérablement la quantité de produit à appliquer dans la parcelle. En intervenant suffisamment tôt dans ces foyers, il y a de fortes chances que les entités infectieuses n'aient pas le temps de se propager dans la parcelle. L'épidémie pourrait ainsi être rapidement circonscrite, ce qui aurait pour conséquence la réduction du nombre théorique de traitements recommandés.

Il n'est donc pas évident de fixer un nombre d'applications à l'avance. La cadence des traitements sera fonction des conditions climatiques, de la pression la maladie et de la rémanence des produits fongiques utilisés.

En revanche, quand la décision de traiter chimiquement est prise, il serait imprudent de limiter l'application en début de campagne aux seuls fruits du tronc de l'arbre, tel que recommandé par l'IRAD en zone agro-écologique à pluviométrie bimodale. Les observations faites lors de cette étude ont montré qu'en début de campagne, on retrouve les fruits malades dans tous les étages du cacaoyer.

5.4. Perspectives

Les analyses statistiques effectuées dans le cadre de la présente étude ne constituent qu'une première étape, car leur valeur explicative est réduite et leur domaine de validité se limite aux périodes et aux zones géographiques où les données de base ont été recueillies.

En effet, pour la dynamique spatio-temporelle, il faudrait être capable de faire des interpolations, c'est-à-dire, sur la base des observations faites sur une petite parcelle, pouvoir faire des estimations locales des valeurs d'une variable en tous points d'une zone géographique plus grande. Ces techniques de *krigeage* (Cressie, 1991) permettront ainsi de dresser des cartes de l'indice d'attaque de *Phytophthora megakarya* dans de plus grandes parcelles.

Concernant des modèles descriptifs de l'épidémie en fonction des variables climatiques, il faudrait être capable, pour des observations faites pendant une période T , de prédire ce que seront les valeurs à un horizon $T+h$. Ce qui implique des travaux plus poussés d'analyse des séries temporelles.

En terme d'épidémiologie de la pourriture brune des cabosses du cacaoyer due *P. megakarya*, plusieurs sujets, qui n'ont pas été traités dans le cadre de cette étude, devront être abordés dans le futur. C'est le cas notamment de :

- la quantification de l'inoculum primaire dans les différentes sources probables (sol, branches, coussinets floraux...) dans les diverses conditions agro-écologiques,
- l'impact de la présence d'autres arbres fruitiers (kolatier, manguier...) sur l'incidence de la pourriture brune des cabosses dans une cacaoyère,
- la corrélation entre la quantité de pluie en air libre et la quantité de pluie sous-cacaoyère,
- la mesure de la durée d'humectation en conditions contrôlées (chambre de rosée) et au champ avec des capteurs appropriés, afin de mieux appréhender le rôle joué par ce facteur dans le développement de l'épidémie.

Sur le plan pratique, une des implications importantes de cette étude est de pouvoir contribuer à l'élaboration d'un modèle d'avertissements agricoles, c'est-à-dire un système de raisonnement basé sur un ensemble de données climatiques et biologiques se rapportant au

cacaoyer et à l'agent pathogène de la pourriture brune des fruits, qui permet de donner au mieux des conseils aux agriculteurs par rapport au risque épidémique potentiel. Cette étude a fait apparaître des tendances plus ou moins nettes dans chacun des sites. Des années d'observations complémentaires sont nécessaires pour finaliser les analyses statistiques et valider les résultats obtenus.

Quant à l'application des résultats, il serait utopique de penser qu'elle soit possible dans les conditions actuelles de la cacaoculture camerounaise. Le verger est vieux (les cacaoyers ont en moyenne plus 30 ans d'âge). Il faut le régénérer avec du matériel végétal plus productif et moins sensible à la pourriture brune des cabosses. La taille moyenne des exploitations est très réduite (2-4 ha), rendant difficilement rentable les schémas de traitements chimiques proposés. Les agriculteurs sont très « accrochés » aux techniques agricoles traditionnelles.

Tous les espoirs d'une relance effective sont placés en une génération de jeunes diplômés et de fonctionnaires retraités qui s'orientent de plus en plus vers le secteur agricole. Ceux-ci, plus réceptifs et possédant des exploitations de grandes superficies, pourront plus facilement appliquer les recommandations qui leur seront faites.

A terme, l'impact des résultats d'une telle étude ne se limitera pas au Cameroun. Les résultats obtenus pourront également être appliqués dans des pays tels que le Nigeria, le Gabon, Sao Tomé et Príncipe qui ont des conditions climatiques semblables à celles du Cameroun et où la pourriture brune des cabosses est également due essentiellement à *Phytophthora megakarya*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agresti, A.** (1990). Categorical data analysis. John Wiley & Sons. New York. 558 p.
- Alemanno, L., Berthouly, M. and Michaux-Ferrière, N.** (1997). A comparison between *Theobroma cacao* L. zygotic embryogenesis and somatic embryogenesis from floral explants. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 33 : 163-172.
- Anonyme** (1999). Bulletin trimestriel des statistiques du cacao. **ICCO** (International Cocoa Organisation). Londres, R.U.
- Anonyme** (2001). Recueil de fiches techniques Tome II. *La Voix du Paysan*, 29-43.
- Anonyme** (2002). Rapport du mois de février. **ED&F Man** Cocoa Ltd.
- Babacauh, K. D.** (1975). Evolution de la pourriture brune dans les conditions naturelles de la cacaoyère ivoirienne. *Café Cacao Thé*, 19 (4) : 293 – 302.
- Babacauh, K. D.** (1980). Structure et dynamique des populations de *Phytophthora sp* parasite du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.). Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris-Sud, Orsay, 153 p.
- Babacauh, K. D.** (1982). Rôle des communautés d'insectes et de l'eau dans la dissémination de *Phytophthora palmivora* (Butl.) Butl. Emend. Bras. Et Griff. Dans les cacaoyères de la Côte. *Café Cacao Thé*, 26 (1) : 31 – 36.
- Babacauh, K. D.** (1983a). Structure des populations de *Phytophthora spp* parasites du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) et autres cultures pérennes en Côte d'Ivoire. *Café Cacao Thé*, 27 (1) : 41-56.
- Babacauh, K. D.** (1983b). Facteurs déterminant la localisation des lésions de pourriture brune des cabosses du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.). I. Age de la cabosse et localisation de la lésion. *Café Cacao Thé*, 27 (1) : 195 – 208.

Babacauh, K. D. (1984). Facteurs déterminant la localisation des lésions de pourriture brune des cabosses du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.). II. Déterminismes impliqués. *Café Cacao Thé*, 28 (2) : 111 – 122.

Bakala, J. (1981). Répartition des types morphologiques de *Phytophthora palmivora* (Butl.) Butl. Au Cameroun. In: Proceedings of the VIIth International Cocoa Research Conference, pp 297-301, Douala, Cameroun.

Berger, R. D. (1988). The analysis of effects of control measures on the development of epidemics. Experimental techniques in plant disease epidemiology. (J. Kranz and J. Rotem, eds.) Springer's, Berlin, pp. 137 – 151.

Berry, D. (1999). Lutte chimique raisonnée et techniques culturales. In : Les maladies des cultures pérennes et tropicales (Ed. Mariau, D.) Cirad, pp 282-294.

Berry, D. et Tafforeau, S. (1991). Lutte chimique contre la pourriture brune des cabosses du cacaoyer. Rapport d'activités. IRA. 13 p.

Berry, D. et Cilas, C. (1994a). Etude du comportement d'une parcelle diallèle 6 x 6 vis-à-vis de la pourriture brune des cabosses du cacaoyer due à *Phytophthora* spp. au Cameroun. *Actes de la 11ème Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère*, 91-96.

Berry, D. et Cilas, C. (1994b). Etude génétique de la réaction à la pourriture brune des cabosses chez des cacaoyers (*Theobroma cacao* L) issus d'un plan de croisements diallèle. *Agronomie*, 14 : 599-609.

Blaha, G. (1983). Effet de la lumière sur *Phytophthora palmivora* et *Phytophthora megakarya*, agents de la pourriture brune des cabosses du cacaoyer. Etude préliminaire du phénomène de photo-inhibition observé sur *Phytophthora megakarya*. *Café Cacao Thé*, 27 (2) : 91-112.

Blaha, G. (1990). Profils isoenzymatiques et RFLP pour l'identification des *Phytophthora* du cacaoyer. *Bulletin OEPP*, Vol. 20, p. 59-65.

Blaha, G. (1995). Données sur la diversité physiologique des populations de *Phytophthora megakarya* et de *Phytophthora palmivora* responsables de la pourriture brune des cabosses du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.). Thèse de doctorat, INPT : Sciences Agronomiques, Phytopathologie Toulouse, 210 p.

Blaha, G. (1998). Simple and cheaper lab method to get maximum *Phytophthora* zoospores. *Incoped Newsletter*, 2 : 4-5.

Blaha, G. et Lotode, R. (1976). Un critère primordial de sélection du cacaoyer au Cameroun : la résistance à la pourriture brune des cabosses. Variations des réactions à la maladie en liaison avec les données écologiques et l'état physiologique des fruits. *Café Cacao Thé*, 20 (2) : 97-116.

Blaha, G. et Paris, N. (1987). Examen en microscopie électronique de l'aspect externe des cabosses du cacaoyer saines ou infectées par *Phytophthora megakarya*. *Café Cacao Thé*, 31 (1) : 23-34.

Boccas, B. (1979). La reproduction sexuée chez *Phytophthora*. Ses voies et quelques unes de ses conséquences génétiques. Travaux et documents de l'ORSTOM, Paris n° 100. 187 p.

Bourbonnais, R. (2000). Econométrie.. Dunod, 3^{ème} édition , Paris.314 p.

Bourke, P. (1996). Cross correlation. [http:// astronomy.swin.edu.au/~pbourke/analysis/](http://astronomy.swin.edu.au/~pbourke/analysis/).

Box, G. E. and Jenkins, G. (1976). Time series analysis. Forcasting and control. Holden-Day.

Brasier, C. M. (1992). Evolutionary biology of *Phytophthora*. Part I: Genetic system, sexuality and the generation of variation. *Ann. Rev. Pathol.* 30: 153-171.

Brasier, C. M. and Griffin, M. J., (1979). Taxonomy of *Phytophthora palmivora* on cocoa. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 72 : 111-43.

Braudeau, J. (1969). Le cacaoyer. Maisonneuve et Larose, Techniques Agricoles et Productions Tropicales, Paris, 304 p.

Café-Fiho, A. C. and Duniway, J. M. (1995). Dispersal of *Phytophthora capsici* and *P. parasitica* in furrow-irrigated rows of bell pepper, tomato and squash. *Plant Pathology*, 44 : 1025-1032.

Campbell, C. L. (1999). The importance of dispersal mechanisms in the epidemiology of *Phytophthora* blights and downy mildews on crop plants. *Ecosystem Health*, 5 : 146-157.

Campbell, C. L. and Madden, L. V. (1990). Introduction to plant disease epidemiology. John Wiley & Sons. 532 p.

Chadoeuf, J., Nandris, D., Geiger, J. P., Nicole, M. et Pierrat, J. C. (1992). Modélisation spatio-temporelle d'une épidémie par un processus de Gibbs : Estimation et tests. *Biometrics*, 48 : 1165-1175.

Chellemi, D. O., Rohrbach, K. G., Yast, R. S., Sonada, R. M. (1988). Analysis of the spatial pattern of plant pathogens and diseased plants using geostatistics. *Phytopathology*, 78 : 221-226.

Cherruault, Y. (1998). Modèles et méthodes mathématiques pour les sciences du vivant. Presses Universitaires de France.

Chevaugnon, J. (1973). Synthèse et bilan. Cah. ORSTOM, Sér. Biol., 20 : 101-104. Third meeting of the Africa Sub-Work Group on *P. Palmivora*. Accra, Ghana.

Choisnel, E. (1979). Apports de la climatologie et de l'agrométéorologie à la prévision des maladies des plantes. In : Les maladies des plantes. III^{èmes} Journées Françaises d'Etudes et d'Informations. Association de Coordination Technique Agricole, Paris.

Cilas, C. (1991). Estimation de quelques paramètres génétiques pour différents plans de croisements chez le cacaoyer. *Café Cacao Thé*, 35 : 3-14.

Cilas, C., Duchemin, C. et Lotode, R. (1989). Genetic improvment of cocoa quality: study of bean size. *Café Cacao Thé* 33 (1) : 3-8.

Cilas, C., Berry, D., Paulin, D., N'goran, J. A. et Djiepor, E. K. (1999). La résistance à la pourriture brune des cabosses au Cameroun, en Côte d'Ivoire, et au Togo. Bilan d'évaluation au champ. *Actes de la 12ème Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère*, 367-373.

Cliff, A. D. and Ord, J. K. (1981). Spatial processes : Models and applications. London, Pion. 266 p.

Cope, F.W. (1962). The mecanism of pollen incompatibility in *Theobroma cacao*. *Heredity*, 17 : 157.

Cressie, N. A. C. (1985b). When are variograms useful in geostatistics ? *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 17 : 693-702.

Cressie, N. A. C. (1991). Statistics for spatial data, New York: John Wiley & Sons. 900 p.

Dade, H. A. (1926). Factors determining the incidence of diseases of cocoa pods. Department of agriculture, *Gold Coast Bulletin*, 7 : 28-34.

Dasgupta, B. and Chitreshwar, S. (1999). Assessment of *Phytophthora* root rot of betelvine and its management using chemicals. *Journal of Mycology and Plant Pathology*, 29 (1) : 91-95

Davous, M. P., Djiepor, E. K., Cilas, C. et Goka, K. (1984). Contribution à la mise au point de la lutte contre la pourriture brune des cabosses du cacaoyer au Togo. Etude des possibilités d'emploi du métalaxyl. *Café Cacao Thé*, 28 (3) : 191-202.

Dayananda, P. W. A., Billard, L. and Chakraborty, S. (1995). Estimation of rate parameter and its relationship with latent infectious periods in plant disease epidemics. *Biometrics*, 51 : 284-292.

De Jesus, A. M., (1992). Exploitation des résultats de l'étude « épidémiologie » sur la pourriture brune. Course report, CIRAD-CP, Montpellier.

De Vallavieille-Pope, C. (1983). Structure d'une population phytopathogène sélectionnée sous la pression d'une population hôte pérenne : le cas de *Phytophthora* sp. inféodé aux agrumes de la pleine orientale corse. Thèse de doctorat. Université de Paris Sus – Centre d'Orsay. 167 p.

De Vallavieille-Pope, C., Giosue S., Lunk, L., Newton A. C., Niks, Ostergard H., Pons Kühnemann, J., Rossi V. and Sache, I. (2000). Assessment of epidemiological parameters and their use in epidemiological and forecasting models of cereal airborne diseases. *Agronomie*, 20 : 715-727.

Despréaux, D. (1988). Etude de la pourriture brune des cabosses du cacaoyer au Cameroun. Deuxième partie : contribution à l'étude de la maladie, groupe de recherche sur les maladies à *Phytophthora* sp. du cacaoyer. IRA, Yaoundé, Cameroun.

Despréaux, D., Cambrony, D., Clément, D., Nyassé, S. et Partiot, M. (1988). Etude de la pourriture brune des cabosses du cacaoyer au Cameroun : définition de nouvelles méthodes de lutte. *Actes de la 10^{ème} Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère*, 407-412.

Despréaux, D., Clément, D. et Partiot, M. (1989). La pourriture brune des cabosses du cacaoyer au Cameroun : Mise en évidence d'un caractère de résistance au champ. *Agronomie*, 9 : 683-91.

Draper, N. R. and Smith, H. (1981). Applied Regression Analysis, 2nd ed. Wiley, New York, 709 p.

Duniway, J. M. (1979). Water relations of water molds. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 17 : 431-460.

Efombagn, M. I. B. (1999). La pourriture brune des fruits du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) due à *Phytophthora megakarya* : caractérisation du pouvoir pathogène des isolats et de la

résistance précoce de familles hybrides. Mémoire de fin d'études, FASA, Université de Dschang. 74 p.

Erselius et Shaw (1982). Protein and enzyme differences between *Phytophthora palmivora* and *P. megakarya* : evidence for self-fertilization in pairing of the two species. *Transactions of the British Mycological Society*, 78 (2) : 227-238.

Erwin, D.C., Ribeiro, O.K. (1996). *Phytophthora Diseases Worldwide*. St. Paul, APS Press.

Eskes, A. B., Paulin, D., Clément D., N'goran, J. A. K., Sounigo, O., Lachenaud, P., Berry, D., Yagmpam, A. (1995) - Selection methods applied and genetic knowledge generated in cocoa breeding in Côte d'Ivoire and Cameroun. *International workshop on cocoa breeding strategies*, University of Reading, Royaume-Uni, 41-56.

Eskes, A. B., Engels, J. et Lass, T. (1998). Le projet CFC/ICCO/IPGRI: Une nouvelle initiative sur l'utilisation et la conservation du germoplasme de cacaoyer. *Plantations, Recherche, Développement*, 5 (6) : 412-417.

Evans, H. C. (1973a). Invertebrate vectors of *Phytophthora palmivora*, causing black pod disease of cocoa in Ghana. *Annals of Applied Biology*, 75 : 331-345.

Falque, (1994). Fécondation et développement des fruits et des graines chez le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.). Influence de l'irradiation du pollen et de l'intensité de la pollinisation. Thèse de doctorat. Inst. Nat. Polytech. Toulouse.

Flament, M. H. (1998). Cartographie génétique de facteurs impliqués dans la résistance du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) à *Phytophthora megakarya* et à *Phytophthora palmivora*. Thèse de doctorat, ENSAM, 112 p.

Förster, H., Kinsherf, T.G., Leong, S.A. and Maxwell, D.P. (1987). Molecular analysis of the mitochondrial genome of *Phytophthora*. *Current Genetics*, 12 : 215-218.

Freycon, V. et Sébastien, B. (1991). La théorie des variables régionalisées. Séminaire Montpellier. 47 p.

Friesland, H. and Schrodter, H. (1987). The analysis of weather factors In: epidemiology (Eds J. Krantz & J. Rotem. Experimental techniques in Plant disease epidemiology). *Springer Verlag*, 115-134.

Fry, W. (1982). Principles of plant disease management. Academic Press, New York, 378 p.

Galindo, J. J. (1992). Prospects of biological control of black pod of cocoa. In: cocoa pest and disease management in South East and Australia (Keane, P. J. and Putter, C. A. J., eds.) 31-38.

Gharbi, A., Sghaier, T., Claustriax, J. J. and Careme, C. (1990). Elaboration and utilization of interactive software for the analysis of tests and demonstrations of plant disease control. *Tropicultura*, 8 : 144-146.

Goodwin, S. B. (1991). DNA polymorphysm in *Phytophthora infestans*: The Cornell experience. In: *Phytophthora*. Lucas, J.A., Shattock, R.C., Shaw, D.S. and Cook, L.R. (Eds). *Br. Mycol. Soc.*, 256-271.

Goumari, A. et Claustriax, J. J. (1990). Etude comparative de modèles des plus proches voisins ajustés à des essais à blanc. *Biom. Praxim.*, 30 : 49-64

Gregory, P. H. (1974). *Phytophthora diseases of cocoa*. Longman Group Limited, London.

Gregory, P. H., Griffin, M. J. and Maddison M. R., (1984). Cocoa black pod: a reinterpretation. *Cocoa Growers Bull.*, 35 : 5-22.

Griffin, M. J. (1976). Cocoa *Phytophthora* workshop, Rothamsted Experimental Station, England. *PANS*, 23 : 107-110.

Gumpertz, M. L., Graham, J. and Ristaino, J.B. (1994). Autologistic model for spatial pattern of *Phytophthora* epidemic in bell pepper: Effects of soil variables on disease presence. In: *Proc. Kansas State Univ. Conf. Appl. Statist.* (James R., ed.), 60-81.

Hickman, C. J. et Ho, H.H. (1966). Behaviour of zoospores in plant pathogenic phycomycetes. *Ann. Rev. Phytopath.*, 4 : 195-220.

Hubert, L. et Gillespie, T. J. (1992). Modelling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annual Review of Pathology*, 30 : 553-577.

Isaaks, and Srivastava, (1989). Applied geostatistics. Oxford University Press, Oxford.

Iwaro, A. D., Ireenivasan, T. N. and Umaharan, P. (1997b). *Phytophthora* resistance in cacao (*Theobroma cacao*): influence of pod morphological characteristics. *Plant pathology*, 46 (4) : 557-565.

Jackson, G. V. and Newhook, F. J. (1978). Sources of *Phytophthora palmivora* inoculum in Salomon Islands cocoa plantations. *Trans. Brit. Mycol. Soc.*, 71 (2) : 239-249.

Jones, G. D. (1998). The epidemiology of plant diseases Kluwer Academic Publishers (Dordrecht/Boston/London), 460 p.

Kellam and Zentmyer (1986). Comparisons of single oospores isolates *Phytophthora* spp from naturally infected cocoa pod in Brasil. *Mycol.*, 78 (3) : 351-358.

Kendall, M. (1976). Time-series. Charles Griffin & Co. Ltd. 197 p.

Knight, R. et Rogers, H. H. (1955). Recent introduction to West Africa of *Theobroma cacao* and related species. *Emp. J. Exper. Agric.*, 23 : 113-25.

Kortekamp, A., Wind, R. et Zyprian, E. (1999). The role of hair on the wettability of grapevine (*Vitis* spp.) leaves. *Vitis*, 38 : 101-105.

Kortekamp, A. et Zyprian, E. (1999). Leaf hairs as basic protective barrier against downy mildew of grape. *Journal of Phytopathology*, 147 : 453-459.

Krause, R. A. and Massie, L. B. (1975). Predictive systems: modern approaches to disease control. *Annual review of Phytophthora*, 13 : 31-45.

Kushalappa, A. C. (1990). Biology and Epidemiology. In: Coffee rust: epidemiology, resistance and management (Kushalappa and Eskes, Eds.). CRC Press.

Lachenaud, P. (1991). Facteurs de la fructification chez le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) : influence sur le nombre de graines par fruits. Thèse de doctorat, INA P-G, France, 188 p.

Lannou, C et Savary, S. (1991). The spatial structure of spontaneous epidemics of different diseases in a groundnut plot. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 97 : 355-367.

Larkin, R. P., Gumpertz, M. L. and Ristaino, J. B. (1995). Geostatistical analysis of *Phytophthora* epidemic development in commercial bell pepper fields. *Phytopathology*, 85 (2) : 191-203.

Lass, R. A. (1985). Disease. In: Cocoa. (Wood, G. A. R. and Lass, R. A., editors). 4th edition, Longman, 265-365.

Leach, A. W., Mumford, J. D. and Krauss, U. (2002). Modelling *Moniliophthora roreri* in Costa Rica. *Crop Prot.*, 21 : 317-326.

Lecoustre, R. and de Reffye, P. (1986). La théorie des variables régionalisées, ses applications possibles dans le domaine épidémiologiques aux recherches agronomiques en particulier sur le palmier à huile et le cocotier. *Oléagineux*, 41 (12) : 541 – 548.

Lepoivre, (1989). Epidémiologie des maladies parasitaires des végétaux. In: Traité de pathologie végétale (Ed. Semal, J.). Les Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique. 323-360.

Letroublon, M. (1996). Vers des modèles potentiels systèmes comme outils d'aide à la décision pour la protection phytosanitaire contre les principales maladies cryptogamiques du vignoble du champagne. DAA, ENSA-Rennes.

Li, Z., Traore, A., Maximova, S. and Gultinan, M. (1998). Somatic embryogenesis and plant regeneration from floral explants of cacao (*Theobroma cacao* L.) using thidiazuron. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant* 34, 293-299.

Littell, R. C., Milliken, G. A., Stroup, W. W. and Wolfinger, R. D., (1996). SAS System for Mixed Models. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, 633 p.

Ljung, G. M. and Box, G. E. P. (1978). On a measure of lack of fit in time series model. *Biometrika*, 65.

Lotodé, R. and Muller, R. A. (1974). Problems of experimentation with cocoa trees. In: *Phytophthora Disease of Cocoa* (PH Gregory, ed), Longman, Londres, Royaume-Uni, pp. 23-50.

Madden, L. V. (1997). Effects of rain on splash dispersal of fungal pathogens. *Canadian journal of Plant pathology*, 225-230.

Maddison, A. C. and Griffin, M. J. (1981). Detection and movement of inoculum. In: *Epidemiology of Phytophthora on cocoa in Nigeria*. Gregory, P. H. and Maddison, A. C., editors. *Phytopathological Paper*, 25 : 31-49.

Maddison, A. C. and Idowu, O. C. (1981). The epidemic on sprayed cocoa at Owena. In: *Epidemiology of Phytophthora on cocoa in Nigeria*. 163-173. *Phytopathological Paper*, 25 : 163-173.

Maréchal, A. (1975). Annales des mines. 12 p.

Mariau, D. (1999). Les maladies des cultures tropicales. Cirad, France.

Mathéron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic geology*, 58 : 1246-1266.

Mathéron, G. (1970). La théorie des variables régionalisées et ses applications. *Les cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau* (5). Ecole des Mines de Paris.

Maximova, S. N., Alemanno, L., Young, A., Ferrière, N., Traore, A. and Guiltinan, M. (2002). Efficiency, genotypic variability, and cellular origin of primary and secondary somatic embryogenesis of *Theobroma cacao* L. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant* (in press).

Mbita, N. J. (1986). Définition d'un modèle épidémiologique des maladies à *Phytophthora* sp. du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.). Contribution à l'étude du cycle infectieux de *Phytophthora megakarya* sur cabosses. Mémoire de fin d'études. ENSA, Dschang. 43 p.

Medeiros, A. G. (1976). Sporulation of *Phytophthora palmivora* (Butl.) Butl. In relation to epidemiology and control of cocoa black pod disease. Ph.D. Thesis, University of California, Riverside, 220 p.

Meulemans (1989). Les champignons phytopathogènes. In: Traité de pathologie végétale (Ed. Semal, J.). Les Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique, 179-195.

Minogue, K.P. and Fry, W.E. (1983). Models for the spread of plant disease: Some experimental results. *Phytopathology*, 73 : 1173-1176.

Moran, P. A. P. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37 : 17-23.

Mossu, G. (1990). Le cacaoyer. Maisonneuve & Larose, Paris. 160 p.

Muller, R. A. (1972). A propos de l'épidémiologie de *Phytophthora palmivora*. *Actes de la 4^{ème} Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère*.

Muller, R. A. (1974a). Effect of prophylactic measures of the dissemination of *Phytophthora palmivora*. In: *Phytophthora Disease of Cocoa* (PH Gregory, ed), Longman, Londres, Royaume-Uni, 169-178.

Muller, R. A. (1974b). Integrated control methods. In: *Phytophthora Disease of Cocoa* (PH Gregory, ed), Longman, Londres, Royaume-Uni, 259-268.

Muller, R. A. (1984). Rappel du schéma épidémique de la pourriture brune des cabosses du cacaoyer au Cameroun et des principes de lutte chimique dans ce pays. Réunion du Groupe International de Travail sur les *Phytophthora* du Cacaoyer, 1, Lomé, 215 p.

Ndoubè-Nkeng, M, Cilas, C. and Bieysse, D. (2001). Multi-trait selection in a diallel crossing scheme of cocoa. *Plant Breeding*, 120 : 365-367.

Neher, D. and Duniway, J. M. (1992). Dispersal of *Phytophthora parasitica* in tomato fields from furrow irrigation. *Plant Disease*, 76 : 582-586.

Nelson, M. R., Orum, T., V., Jaime-Garcia, R., Nadeem, A. (1999). Applications of geographic information systems and geostatistics in plant disease epidemiology and management. *Plant Disease*, 83 : 308-319.

Newhook, F. J. and Jackson, G. V. H. (1978). *Phytophthora palmivora* in cocoa plantation soil in the Salomon Islands. *Trans. Brit. Mycol. Soc.*, 69 : 31-38.

Newhook, F. J., Waterhouse, G.M. and Stamps, D.J. (1978). Tabular key to the species of *Phytophthora* de Bary. *Mycological paper*, 143, 20 p.

Ngambi-Ndjama, J. M., Tondje, P. R. et Ngo-Ndong A. F. (1986) - L'amélioration de la productivité du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en saison sèche : méthode de lutte contre la pourriture brune par la stratégie d'esquive. *Revue Science et Technique. Série Sciences Agronomiques et Zootechniques*, 2 (2) : 89-97.

N'goran, J. A. K. (1994). Contribution à l'étude génétique du cacaoyer par les marqueurs moléculaires : diversité génétique et recherche de QTLs. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 105 p.

Nikita H. (1992). Histoire du chocolat. Editions Desjonqueres, Paris. 291 p.

Nwaga, D. (1984). Contribution à l'amélioration génétique de la résistance du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) à la pourriture brune des cabosses due à *Phytophthora* spp. : Mise au

point d'un test précoce de la résistance. Mémoire DEA - Ecophysiologie et Génétique végétales, Rennes.

Nya-Ngatchou (1979). Etat d'avancement des travaux de génétique et d'amélioration du cacaoyer. *Actes de la 7^{ème} Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère*, 507-511.

Nyassé, S. (1992). Structure d'une population de *Phytophthora sp.* des cacaoyères camerounaises atteintes de pourriture brune. DRU Sciences agronomiques, Inst. Nat. Polytechn. de Toulouse.

Nyassé, S. (1997). Etude de la diversité de *Phytophthora megakarya* et caractérisation de la résistance du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) à cet agent. Thèse de Doctorat, Inst. Nat. Polytechn. de Toulouse. 133 p.

Nyassé, S., Grivet, L., Risterucci, A. M., Blaha, G., Berry, D., Lanaud, C. et Despréaux, D. (1999). Diversity of *Phytophthora megakarya* in Central and West Africa revealed by isozyme and RAPD markers. *Mycol. Res.*, 103 (10) : 1225-1234.

Oddamtten, G. T. et Clerk, G. C. (1984). Etude de l'usage possible de deux champignons édaphiques *Aspergillus niger* et *Trocoderma viride* comme agents de lutte biologique contre *Phytophthora palmivora* et l'effet de leurs métabolismes sur les plantules du cacaoyer. *Actes de la 9^{ème} Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère*, 267-269.

Okaisabor, E. K. (1969). The survival of *Phytophthora palmivora* (Butl.) Butl. through the dry season. *Nigerian Agric. J.*, 6 : 85-89.

Okaisabor, E. K. (1970). Epidemiology of *Phytophthora palmivora*. Rept.. cocoa Res. Inst., Nigeria, p 47.

Onesirosan, P. T. (1971). The survival of *Phytophthora palmivora* in a cacao plantation during the dry season. *Phytopathology*, 61: 975-977.

Opeke, L. K. and Korentz, A. M. (1974). *Phytophthora* pod rot: symptoms and economic importance. In: *Phytophthora* Disease of Cocoa (P.H. Gregory, ed.), Longman, Londres, Royaume-Uni, 117-125.

Ortiz-Garcia, C. F. (1996). Etude de la diversité génétique de populations de *Phytophthora* pathogènes du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) et du cocotier (*Cocos nucifera* L.). Thèse de Doctorat : Biologie Cellulaire et Moléculaire Végétale, Université Paul Sabatier, Toulouse, 129 p.

Ortiz-Garcia, C. F., Hérail, C. et Blaha, G. (1994). Utilisation des isoenzymes en tant que marqueurs pour l'identification spécifique des *Phytophthora* responsables de la pourriture brune des cabosses dans les pays producteurs de cacao. *Actes de la 11^{ème} Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère*, 135-143.

Parry, D. W. (1990). Plant pathology in agriculture. Cambridge University Press. 385 p.

Partiot, M. (1975). La résistance horizontale du cacaoyer au *Phytophthora* species. *Café Cacao Thé*, 19 : 123-130.

Partiot, M. (1976). La résistance horizontale du cacaoyer au *Phytophthora* sp : contribution à l'étude de son évaluation de son amélioration et de son utilisation. Thèse de doctorat d 3^{ème} cycle. Université de Paris Sud, Centre d'Orsay, 89 p.

Partiot, M., Abogo, A., Bakala, J., Castaing, X., Debost, M., Despréaux, D., Essomba, N., Kadje, A., Ngambi, J. M., Nyemb, E. et Nyemba, J. (1984). Les maladies à *Phytophthora* spp du cacaoyer au Cameroun. : analyse des résultats obtenus en 1983-84. *Actes de la 9^{ème} Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère*, 81-83.

Paulin, D. (1990) - Analyse d'essais d'hybrides de cacaoyers en Côte d'Ivoire pour la production, la vigueur et la sensibilité à la pourriture brune. Mémoire DEA - Amélioration des plantes, E.N.S.A - Rennes, 58 p.

Paulin, D., Mossu, G., Lachenaud, P. et Eskes, A. B. (1994) - Genetic analysis of a factorial crossing scheme with cacao hybrids tested in four locations in Ivory Coast. *Actes de la 11^{ème} Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère*, 73-83.

Paulin, D. et Eskes, A. B. (1995). - Cocoa: breeding strategies. *Plant Rech. Dev.*, 2 (6) : 5-18.

Pavé, A. (1994). Modélisation en biologie et en écologie. Aléas.

Pohe, J. (1996). Contribution à l'étude de la pourriture du coeur et de la chute des noix immatures du cocotier dues à *Phytophthora katsurae* (Ko et Chang) en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat; INA P-G. 179 p.

Quenouille, M. H. (1949). The joint distribution of serial correlation coefficients. *Annual Review of Mathematical Statistics*, 20.

Rapilly, F. (1991). L'épidémiologie en pathologie végétale. Mycoses aériennes. INRA, Paris. 317 p.

Reffye Ph. de, Parvais, J. P., Mossu, G., et Lucas, P. (1978). Influence des aléas de la pollinisation sur les rendements du cacaoyer. Modèle mathématique et simulation. *Café Cacao Thé*, 22 (4) : 251-274.

Rémond, F. (1996). Mise au point de méthodes d'échantillonnage pour estimer les attaques des fruits du caféier par les scolytes (*Hypothenemus hampei* Ferr.). Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II.

Reynolds, K. M. and Madden L. V. (1988). Analysis of epidemics using spatio-temporal autocorrelation. *Phytopathology*, 78 : 240-246.

Ristaino, J. B., Larkin, R. P. and Campbell, C. L. (1993). Spatial and temporal dynamics of *Phytophthora* epidemics in commercial bell pepper fields. *Phytopathology*, 84 : 1015-1024.

Ristaino, J. B. and Johnston, S. A. (1999). Ecologically based approaches to management of *Phytophthora* Blight on bell pepper. *Plant disease*, 83 (12).

Ristaino, J. B. and Gumpert, M. L. (2000). New frontiers in the study of dispersal and spatial analysis of epidemics caused by species in the genus *Phytophthora*. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 38 : 541-76.

Roger, V. J. (1954). *Phytopathologie des pays chauds*. Vols 1-3. Paris, Lechevalier .

Roger, V. J. (1987). *Une approche mathématique de la biologie*. Gaëtan Morin (éditeur)

Rotem, J. (1978). Climatic and wheather influences on epidemics. In: *Plant Disease advanced treatise*. Vol. II Ed. Horsfall et Dimond Academic Press, 317-337.

Ruf, F. (1995). Booms et crises du cacao : les vertiges de l'or brun. Ministère de la Coopération. CIRAD-SAR et éditions KARTHALA. 459 p.

Sache, I. (1999). Le vent et la dissémination des champignons phytopathogènes. *Phytoma - La Défense des Végétaux*, 513 : 12-15.

Sache, I. (2000). Short-distance dispersal of wheat rust spores by rain and wind. *Agronomie*, 20 : 757-767.

Sansome, E., Brasier, C. M. and Griffin, M. J. (1975). Chromosome size difference in *Phytophthora palmivora*, a pathogen of cocoa. *Nature*, 255 : 704-705.

Saporta, G. (1990). *Probabilités, analyses des données et statistiques*. Société des éditions Technip.

SAS Institute Inc. (2001). *SAS User's Guide : Statistics*. Institute Inc. Release 8.2, Cary, NC, USA

Savary, S., Willocquet, L. and Teng, P. S. (1997). Modelling sheat blight epidemics on rice tillers. *Agricultural Systems*, 55 (3) : 359-384.

Savary, S., Castilla, N. P. and Willocquet, L. (2001). Analysis of the spatiotemporal structure of rice sheath blight epidemics in a farmer's field. *Plant pathology*, 50 : 53-68.

Semal (1989). Les maladies des plantes : concepts généraux. In: Traité de pathologie végétale (Ed. Semal, J.). Les Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique, 11-38.

Shaw, D. S. (1988). The *Phytophthora* spp. In: Advances in plant pathology. (Ingram, D.S. and William, P. H., eds). *A. P.*, 6: 27-51.

Shaw, M.W. (1994). Modeling stochastic processes in plant pathology. *Annual Review of Phytopathology*, 32 : 523-544.

Shigesada, N., Kawasaki, K., Takeda, Y. (1995). Modeling stratified diffusion in biological invasions. *American Naturalist*, 146 : 229-251.

Snedecor, G. W. et Cochran, W. G. (1957). Méthodes Statistiques. The Iowa State University Press. Iowa. 641 p.

Soberanis, W., Rios, R., Arévalo, E., Zúñiga, L., Cabezas, O. and Krauss, U. (1999). Increased frequency of phytosanitary pod removal in cacao (*Theobroma cacao*) increases yield economically in eastern Peru. *Crop Prot.*, 18 : 677 - 685.

Soria, V. J. (1970). Principal varieties of cocoa cultivated on tropical America. *Cocoa Growers Bulletin*, 15 : 12-21.

S-plus (2000). User's Guide : Data Analysis. Products Division, Mathsoft, Seattle, WA.

Stein, A., Kocks, C.G., Zadoks, J.C., Frinking, H.D., Ruissen, M.A., Myers, D.E. (1994). A geostatistical analysis of the spatio-temporal development of downy mildew epidemics in cabbage. *Phytopathology*, 84 : 1227-1239.

Tarjot, M. (1971). Nouvelle contribution à l'étude de la pourriture brune des cabosses du cacaoyer due au *Phytophthora palmivora* (Butl.) Butl. En Côte d'Ivoire. *Café Cacao Thé*, 16 (1) : 31 - 48.

Tarjot, M. (1972). Etude anatomique de la cabosse de cacaoyer en relation avec l'attaque du *Phytophthora palmivora*. *Café Cacao Thé*, 16 (2) : 123 – 134.

Tarjot, M. (1974). Physiology of fungus. In: *Phytophthora Disease of Cocoa* (PH Gregory, ed), Longman, Londres, Royaume-Uni, 103-116.

Taylor, L. R. (1984). Assessing and interpreting the spatial distribution of insect populations. *Annu. Rev. Entomol.*, 29 : 321-357.

Thieme, H. R. and Heesterbeek, J. A. P. (1989). How to estimate the efficiency of periodic control of an infectious plant disease. *Math. Biosci.*, 93 : 15-29.

Thorold, C. A. (1975). Black Pod Disease. In: *Diseases of cocoa*. Oxford University Press, Oxford, UK.

Tomassone, R., Dervin, C. et Masson, J. P. (1993). Biométrie. Modélisation des phénomènes biologiques. Masson, Paris. 553 p.

Tondjè, P. R., Berry, D., Bakala, J., et Ebandan, S. (1993). Intérêt de diverses pratiques culturales dans la lutte contre la pourriture des cabosses du cacaoyer due *Phytophthora spp.* au Cameroun. *Actes de la 11^{ème} Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère*, 175-183.

Toxopeus, H. (1972). Cocoa breeding: consequence of mating system, heterosis and population structure. In: *Cocoa and coconuts in Malaysia*, Kuala Lumpur, Malaysia, 3-12

Trangmar, B. B., Yost, R. S. and Uehara, G (1985). Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, 38 : 45-74.

Ulloa et Hanlin (2000) Illustrated dictionary of mycology. St Paul, Minnesota, APS Press. 448 p.

Waggoner, P. E. and Rich, S. (1981). Lesion distribution, multiple infection, and the logistic increase of plant disease. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 78 : 3292-3295.

Van de Lande, H. L. (1993). Spatio-temporal analysis of spear rot and 'marchitez sorpresiva' in African oil palm in Surinam. *Neth. J. Pl. Path.*, 99 (3) : 129-138.

Van de Lande, H. L and Zadoks, J. C. (1999). Spatial pattern of spear rot in oil palm plantations in Surinam. *Plant Pathology*, 48 : 189-201.

Van der Plank, J. E. (1963). Plant disease: epidemics and control. New York, Academic Press, 344 p.

Wanner, (1966). The first cocoa trees in Ghana. Basle Trading Company Ltd.

Ward, M. R. and Griffin, M. J. (1981). Soil phase of cocoa *Phytophthora*. In: Epidemiology of cocoa in Nigeria. Gregory, P. H. (ed.) *Commonw. Mycol. Inst. Phytopathol. Pap.*, 25 : 50-61.

Waterhouse, G. M. (1963). Keys to species of *Phytophthora* de Bary. *Mycol. Pap.*, 92 22 p.

Waterhouse, G. M. and Stamps, D. J. (1970). Isolation of *Phytophthora* and *Phytium*. In: isolation methods for Microbiologists (Ed. D.A. Shapton and G.W. Gould). Society for Applied Bacteriology, Technical series (3) : 99-102.

Wood, R. A. (1974). Black pod: Meteorological factors. In: *Phytophthora Disease of Cocoa* (P.H. Gregory, ed.), Longman, Londres, Royaume-Uni, 153-159.

Wood G. A. R. (1985) - History and development. In: *Cocoa*. Longman, London, 620 p.

Wood G. A. R. (1991). A history of early cocoa introductions. *Cocoa Growers Bul.*, 44: 7-12.

Wu, B. M., van Bruggen, A. H. C., Subbarao, K. V., Pennings, G. G. H. (2001). Spatial analysis of lettuce downy mildew using geostatistics and geographic information systems. *Phytopathology*, 91 : 134-142.

Zadoks, J. C., van den Bosch, F. (1994). On the spread of plant disease: A theory of foci. *Annual Review of Phytopathology*, 32 : 503-521.

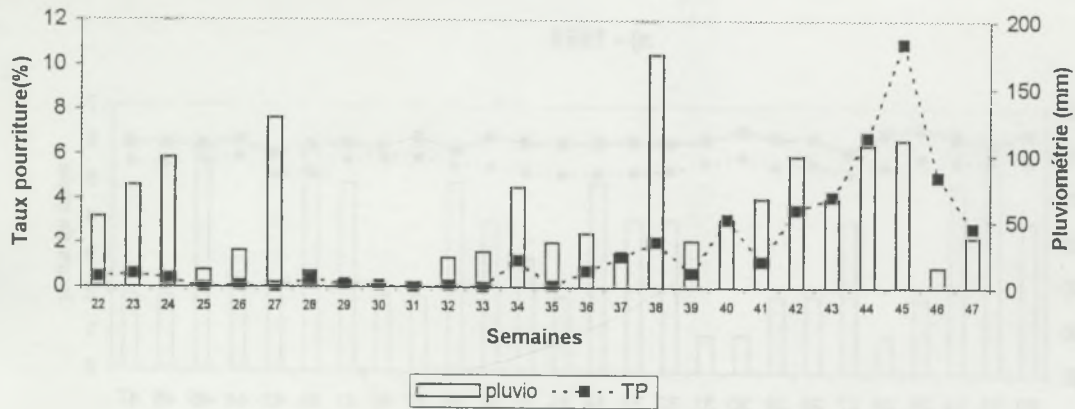
Zentmyer, G. A. (1980). *Phytophthora cinnamoni* and the diseases it causes. Monograph, *American Phytopathological Society*, 10, 96 p.

Zentmyer, G. A., Guillemet, F.B., Harjung, M.K. et Zaki, A. (1977). Resistance to *Phytophthora* root rot. Yearbook. *California Avocado Society*, 61 : 76-79.

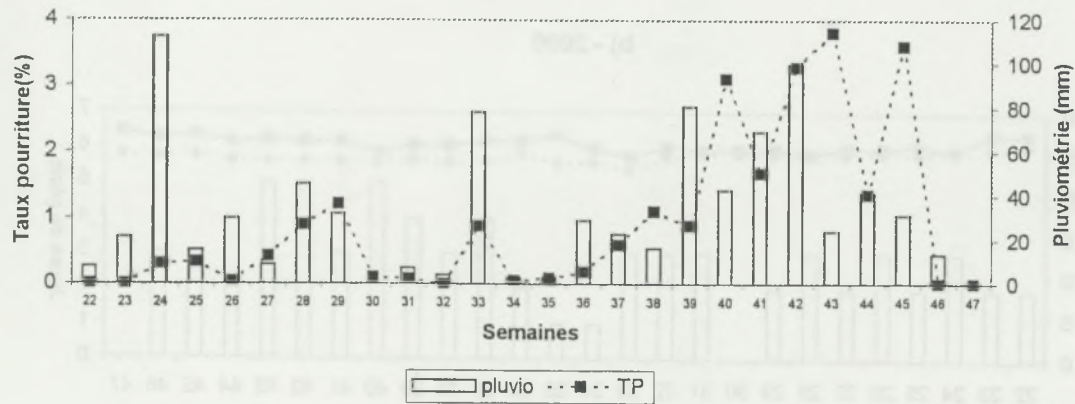
ANNEXE 1

**Figures d'évolution du taux de pourriture et des températures
à Goura et à Barombi-Kang**

a) 1999



b) 2000



c) 2001

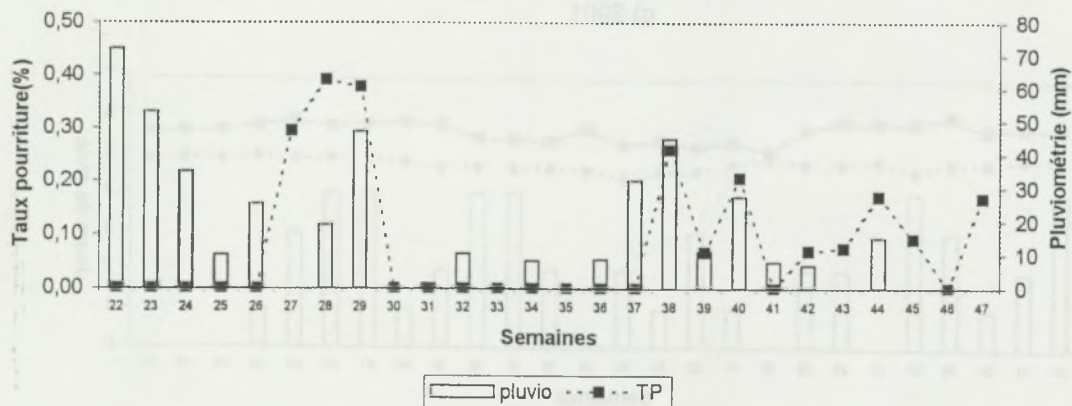


Figure 2.3 : EVOLUTION DU TAUX DE POURRITURE HEBDOMADAIRE ET DE LA PLUVIOMETRIE A GOURA

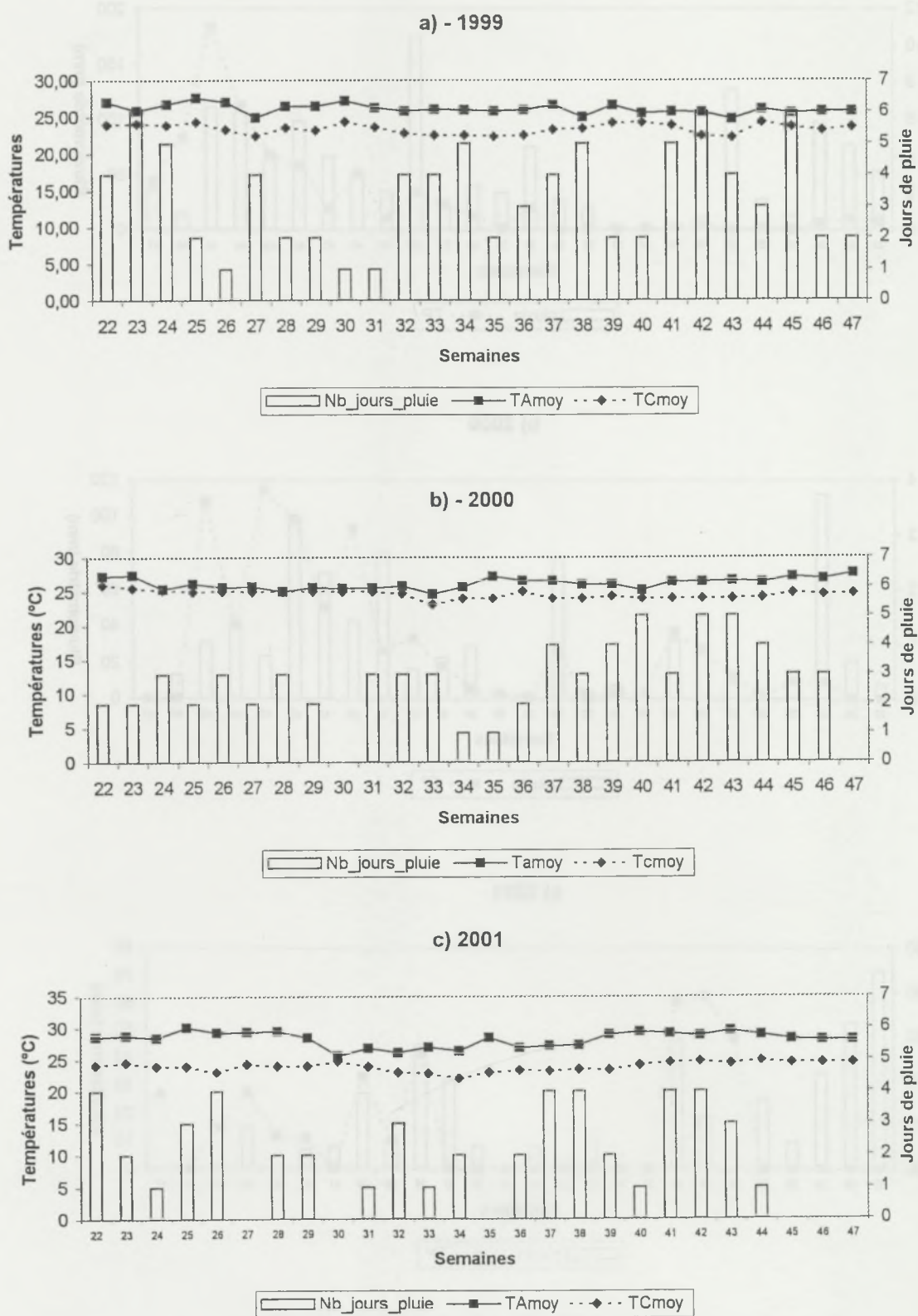
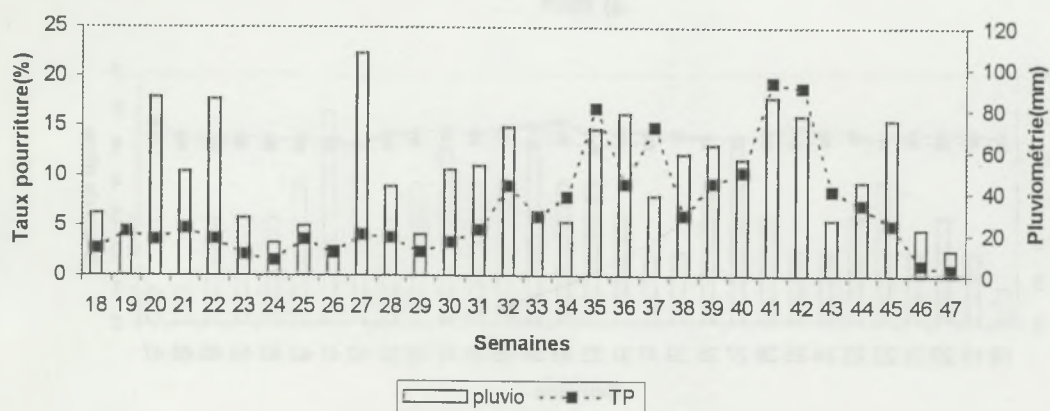
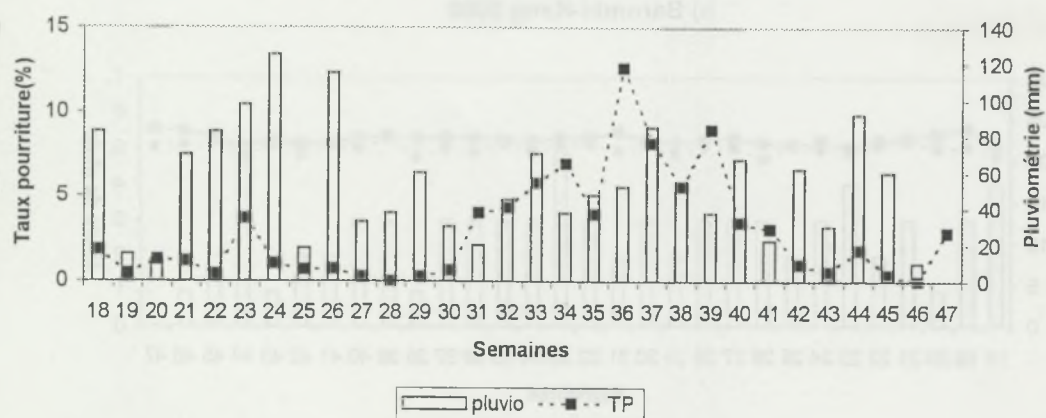


Figure 2.4 : EVOLUTION DES TEMPERATURES MOYENNES AMBIANTES ET SOUS CACAOYERE ET DU NOMBRE DE JOURS DE PLUIE PAR SEMAINE A GOURA

a) 1999



b) 2000



c) 2001

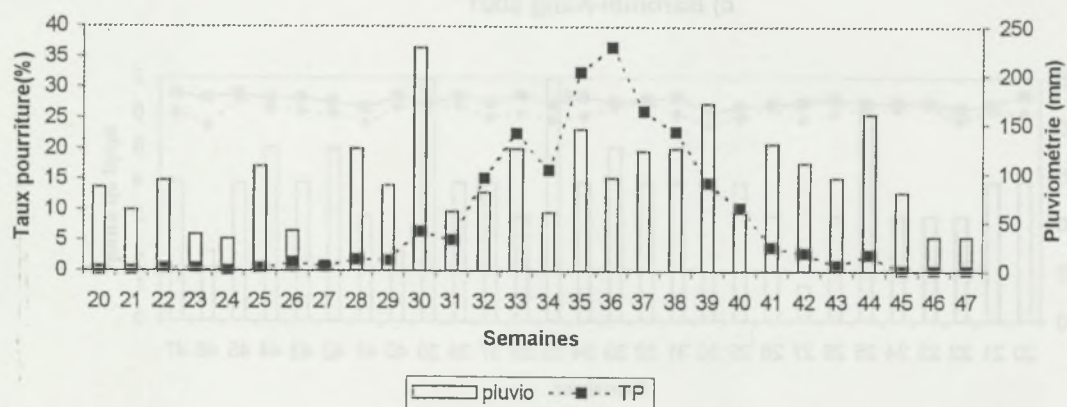
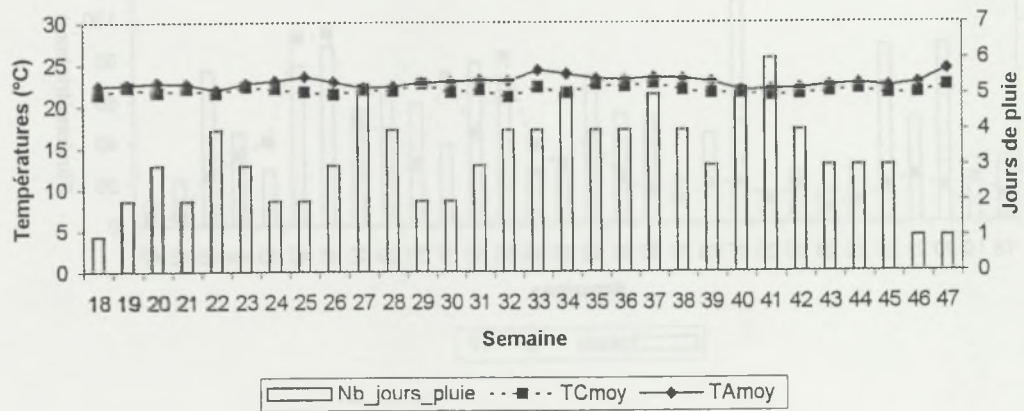
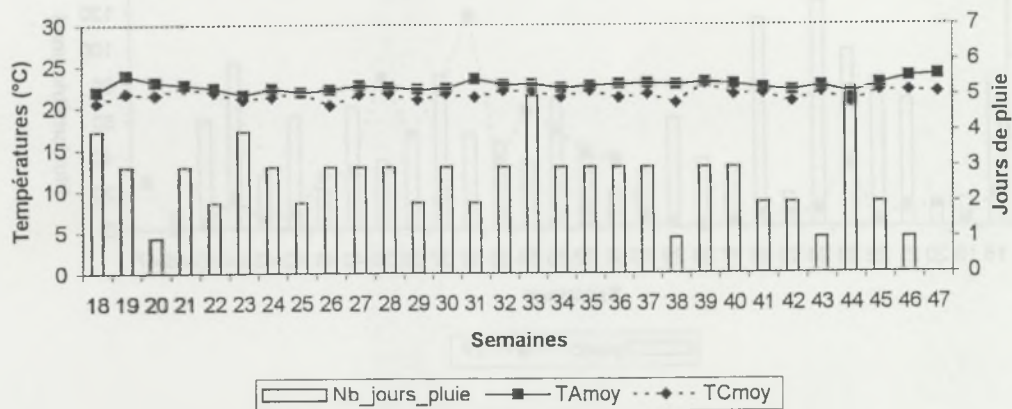


Figure 2.5 : EVOLUTION DU TAUX DE POURRITURE HEBDOMADAIRE ET DE LA PLUVIOMETRIE A BAROMBI-KANG

a) 1999



b) Barombi-Kang 2000



c) Barombi-Kang 2001

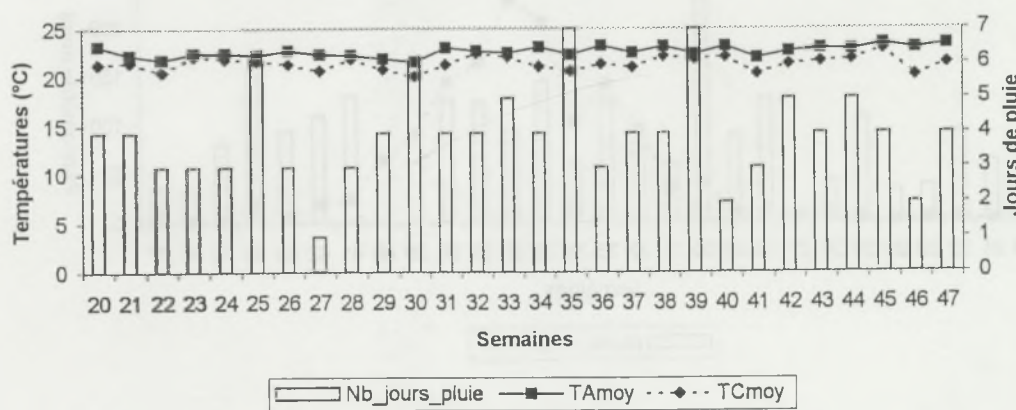


Figure 2.6 : EVOLUTION DES TEMPERATURES MOYENNES AMBIANTES ET SOUS CACAOYERE ET DU NOMBRE DE JOURS DE PLUIE PAR SEMAINE A BAROMBI-KANG

ANNEXE 2

**Corrélogrammes des autocorrélations et des corrélations croisées
à Goura et à Barombi-Kang**

----- 1999 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	1858.945	1.00000													*****									0
1	86.566857	0.04657													*									0.196116
2	-51.733772	-.02783													*									0.196541
3	263.259	0.14162													***									0.196692
4	378.559	0.20364													****									0.200576
5	-203.232	-.10933										**												0.208376
6	18.713814	0.01007																						0.210571

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 54.19038; Ecart-type: 43.11549; Nombre d'observations : 26
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.8672)

----- 2000 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	944.137	1.00000													*****									0
1	17.351038	0.01838																						0.196116
2	-9.686386	-.01026																						0.196182
3	72.931457	0.07725													**									0.196203
4	-28.250287	-.02992											*											0.197369
5	-74.185432	-.07857										**												0.197544
6	-152.236	-.16124										***												0.198742

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 32.26154; Ecart-type: 30.72681; Nombre d'observations : 26
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.9663)

----- site=5 annee=2001 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	373.875	1.00000													*****									0
1	137.930	0.36892													*****									0.196116
2	46.737066	0.12501													***									0.221203
3	11.616650	0.03107													*									0.223904
4	-17.128500	-.04581										*												0.224070
5	-45.236942	-.12099										**												0.224430
6	15.843714	0.04238													*									0.226925

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 16.79231 ; Ecart-type: 19.33584 ; Nombre d'observations : 26
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.5298)

Figure 2.11 : Corrélogrammes de la pluviométrie à Goura (1999 - 2001)

----- 1999 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	668.496	1.00000													*****									0
1	-1.924593	-.00288																						0.182574
2	-175.403	-.26238									*****													0.182576
3	-29.653222	-.04436									*													0.194740
4	-16.881704	-.02525									*													0.195076
5	124.349	0.18601													****									0.195185
6	-55.623667	-.08321									**													0.201008
7	-26.098259	-.03904									*													0.202152

"," symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 48.76667; Ecart-type: 25.85528; Nombre d'observations : 30
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.6686)

----- 2000 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	986.411	1.00000													*****									0
1	-8.093231	-.00820																						0.182574
2	32.142426	0.03259									*													0.182586
3	-54.121361	-.05487									*													0.182780
4	-118.293	-.11992									**													0.183328
5	-14.831435	-.01504																						0.185925
6	-63.193833	-.06406									*													0.185965
7	-102.910	-.10433									**													0.186700

"," symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 52.38333; Ecart-type: 31.40719; Nombre d'observations : 30
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.9907)

----- 2001 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	2328.131	1.00000													*****									0
1	-12.317386	-.00529																						0.188982
2	309.648	0.13300													***									0.188988
3	144.523	0.06208									*													0.192301
4	-226.194	-.09716									**													0.193016
5	446.663	0.19185													****									0.194755
6	-111.747	-.04800									*													0.201391
7	-132.226	-.05679									*													0.201800

"," symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 92.69643; Ecart-type: 48.25071; Nombre d'observations : 28
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.8724)

Figure 2.12 : Corrélogrammes de la pluviométrie à Barombi-Kang (1999 - 2001)

----- 1999 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	6.429947	1.00000												*****										0
1	4.694407	0.73008												*****										0.196116
2	3.363402	0.52308												*****										0.281893
3	2.115319	0.32898												*****										0.317034
4	1.298177	0.20190												****										0.329903
5	1.089671	0.16947												***										0.334621
6	0.571657	0.08891												**										0.337906

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 1.759004; Ecart-type: 2.535734; Nombre d'observations : 26
Bruit aléatoire (Probabilité critique : < 0.0001)

----- 2000 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	1.385913	1.00000												*****										0
1	0.633799	0.45732												*****										0.196116
2	0.675360	0.48730												*****										0.233557
3	0.480902	0.34699												*****										0.269844
4	0.034130	0.02463																						0.286491
5	0.142678	0.10295												**										0.286573
6	-0.224298	-.16184												***										0.287992

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 0.921092; Ecart-type: 1.177248; Nombre d'observations : 26
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.0052)

----- 2001 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	0.015018	1.00000												*****										0
1	0.0058914	0.39230												*****										0.196116
2	0.0012156	0.08095												**										0.224276
3	-0.0048042	-.31991												*****										0.225397
4	-0.0039190	-.26096												*****										0.242232
5	-0.0043080	-.28686												*****										0.252813
6	-0.0038363	-.25546												*****										0.265037

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 0.083402; Ecart-type: 0.122546; Nombre d'observations : 26
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.0174)

Figure 2.14 : Corrélogrammes du taux de pourriture à Goura (1999 - 2001)

----- 1999 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	25.004922	1.00000													*****									0
1	15.487358	0.61937													*****									0.182574
2	11.255605	0.45014													*****									0.242710
3	5.968457	0.23869													*****									0.269103
4	4.209102	0.16833													***									0.276070
5	3.459919	0.13837													***									0.279470
6	3.009371	0.12035													**									0.281744
7	3.863233	0.15450													***									0.283453

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 6.575821; Ecart-type: 5.000492; Nombre d'observations : 30
Bruit aléatoire (Probabilité critique : 0.0005)

----- 2000 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	9.331665	1.00000													*****									0
1	5.911274	0.63346													*****									0.182574
2	5.411611	0.57992													*****									0.245123
3	4.747734	0.50878													*****									0.287238
4	1.439123	0.15422													***									0.315852
5	0.890673	0.09545													**									0.318352
6	-1.488524	-.15951										***												0.319304
7	-2.683068	-.28752									*****													0.321950

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 2.859193; Ecart-type: 3.054777; Nombre d'observations : 30
Bruit aléatoire (Probabilité critique : < 0.0001)

----- 2001 -----

Autocorrelations

Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Std Error
0	114.135	1.00000													*****									0
1	98.469120	0.86274													*****									0.188982
2	80.631136	0.70645													*****									0.298128
3	60.308108	0.52839													*****									0.352887
4	30.998684	0.27160													*****									0.380094
5	4.803712	0.04209													*									0.386963
6	-17.645734	-.15460										***												0.387127
7	-35.578005	-.31172									*****													0.389326

"." symbolise 2 erreurs types

Moyenne de la série : 8.023571; Ecart-type: 10.68339; Nombre d'observations : 28
Bruit aléatoire (Probabilité critique : <0.0001)

Figure 2.15 : Corrélogrammes du taux de pourriture
à Barombi-Kang (1999 - 2001)

Pluviométrie à Mbankomo

----- 1999 -----												
		Variance of input =		1858.945								
		Number of Observations		26								
Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1
-6	4.571990	0.04182										*
-5	5.735194	0.05246										*
-4	12.688455	0.11606										**
-3	4.663250	0.04265										*
-2	6.641374	0.06075										*
-1	11.946936	0.10927										**
0	36.945503	0.33793										*****
1	40.407266	0.36959										*****
2	45.159027	0.41305										*****
3	24.680504	0.22574										*****
4	25.029791	0.22894										*****
5	11.012467	0.10073										**
6	17.777789	0.16261										***

"." symbolise 2 erreurs types

----- 2000 -----												
		Variance of input =		944.137								
		Number of Observations		26								
Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1
-6	-4.216269	-.11656										**
-5	-3.923982	-.10848										**
-4	-1.081045	-.02989										*
-3	-1.800464	-.04977										*
-2	0.951100	0.02629										*
-1	4.728263	0.13071										***
0	13.883110	0.38380										*****
1	18.917370	0.52297										*****
2	4.709986	0.13021										***
3	12.116046	0.33495										*****
4	8.303373	0.22955										*****
5	-1.706023	-.04716										*
6	-3.067947	-.08481										**

"." symbolise 2 erreurs types

Figure 2.17: Corrélations croisées Taux de pourriture - Pluviométrie à Goura

----- 1999 -----																								
Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	
-7	0.854488	0.00661								.						.								
-6	-1.553719	-.01202								.						.								
-5	-1.856135	-.01436								.						.								
-4	15.135949	0.11707								.				**										
-3	16.823650	0.13012								.				***		.								
-2	0.280139	0.00217								.														
-1	33.417822	0.25847								.				*****	.									
0	32.263322	0.24954								.				*****	.									
1	59.434364	0.45970								.				*****	***									
2	6.738311	0.05212								.				*		.								
3	14.532932	0.11241								.				**		.								
4	4.699455	0.03635								.				*		.								
5	20.427293	0.15800								.				***		.								
6	-1.215521	-.00940								.						.								
7	-4.646414	-.03594								.		*			.									

"." symbolise 2 erreurs types

----- 2000 -----																								
Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	
-7	-14.640803	-.15260											***											
-6	7.929630	0.08265												**										
-5	-2.283369	-.02380																						
-4	-1.079664	-.01125																						
-3	6.248037	0.06512												*										
-2	-10.683491	-.11135										**												
-1	21.282683	0.22183												****										
0	3.696288	0.03853												*										
1	-8.770624	-.09142										**												
2	-10.659363	-.11110										**												
3	-14.667337	-.15288											***											
4	-21.219307	-.22117											****											
5	-19.027477	-.19832											****											
6	-24.868702	-.25921											*****											
7	-4.853499	-.05059											*											

"." symbolise 2 erreurs types

----- 2001 -----																								
Lag	Covariance	Correlation	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	
-7	26.691494	0.05178												*										
-6	115.427	0.22392												****										
-5	101.048	0.19603												****										
-4	137.619	0.26697												*****										
-3	95.015771	0.18432												****										
-2	83.319816	0.16164												***										
-1	148.438	0.28796												*****										
0	180.361	0.34989												*****										
1	188.886	0.36643												*****										
2	174.825	0.33915												*****										
3	95.843089	0.18593												****										
4	27.584486	0.05351												*										
5	87.896218	0.17051												***										
6	41.231450	0.07999												**										
7	28.467497	0.05523												*										

"." symbolise 2 erreurs types

Figure 2.18: Corrélations croisées Taux de pourriture - Pluviométrie à Barombi-Kang

ANNEXE 3

**Cartes de la répartition spatiale du nombre total de cabosses
et de l'incidence de la maladie à Mbankomo et à Goura**

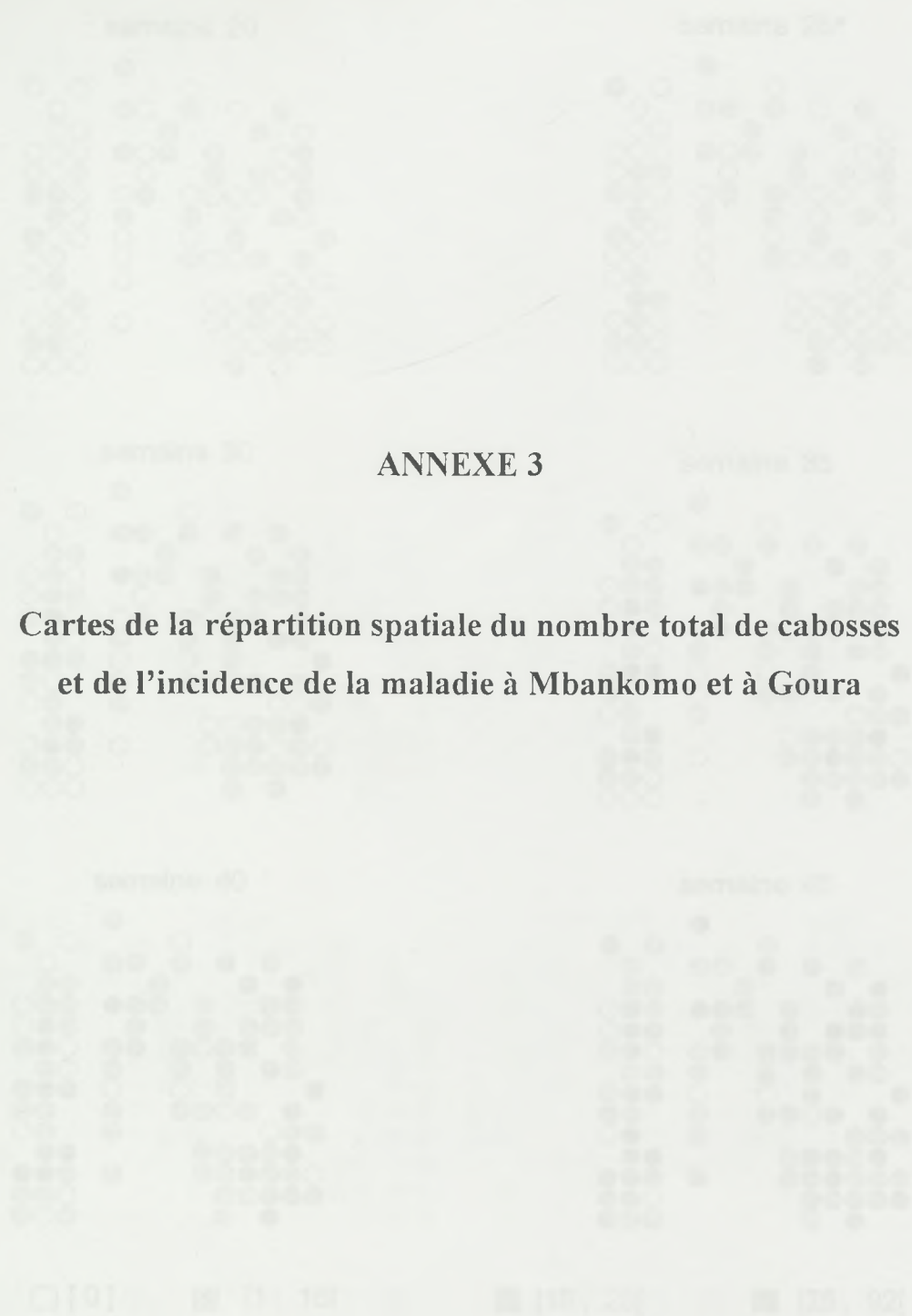


Figure 3.7 Répartition du nombre total de cabosses par hectare à Mbankomo en 2000.
(*) Etant donné l'importance de la maladie

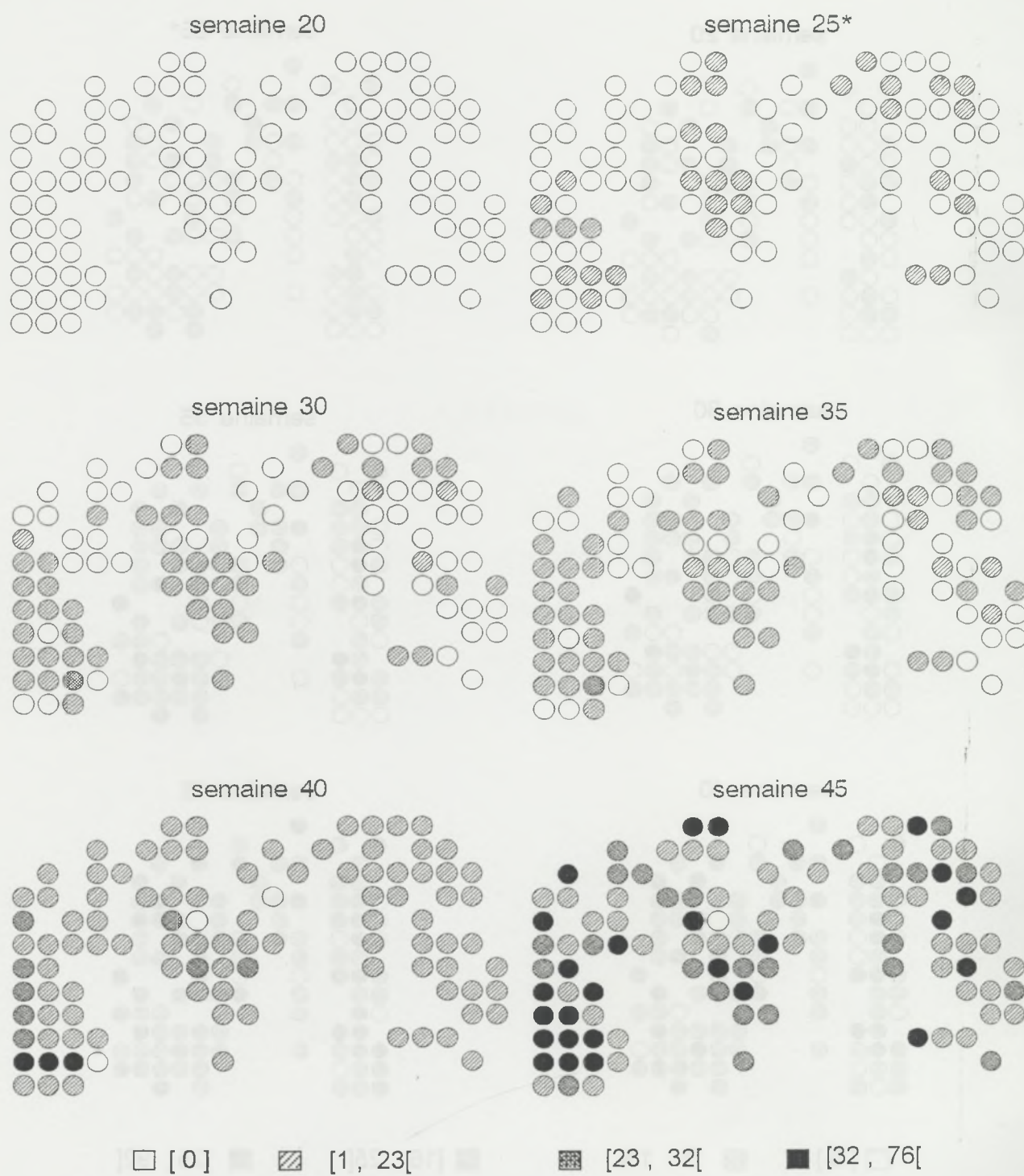


Figure 3.8 : Répartition du nombre total de cabosses par arbre à Goura en 2000
 (* Début phase exponentielle de la maladie)

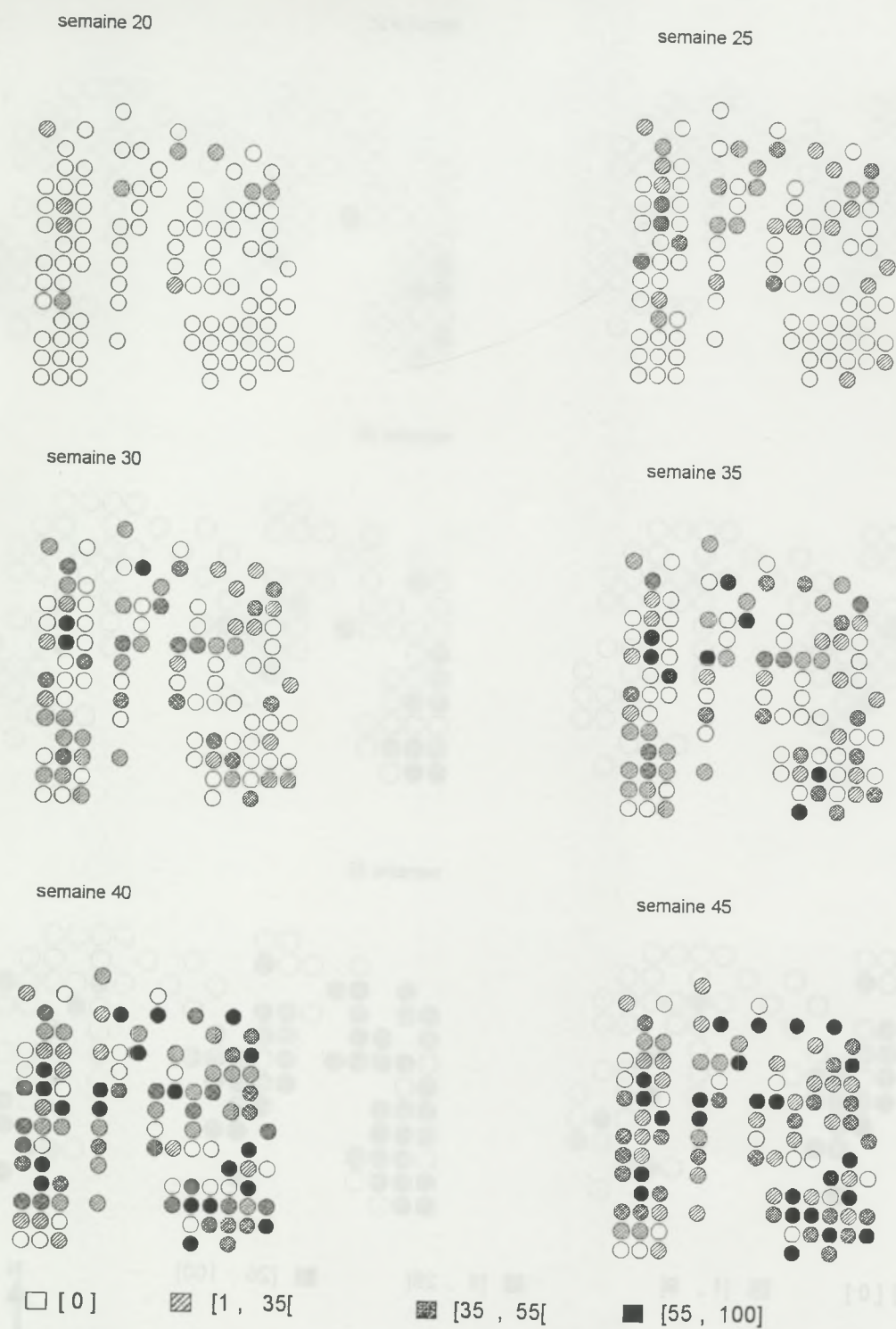
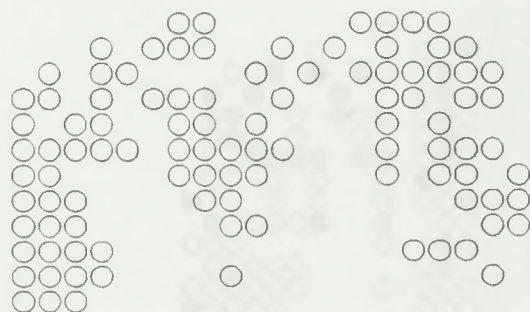
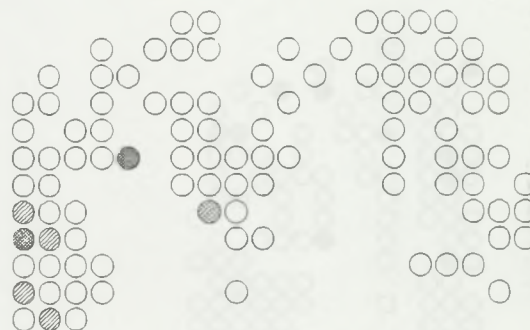


Figure 3.10 : Répartition de l'incidence de la maladie (en %) par arbre à Mbankomo en 1999

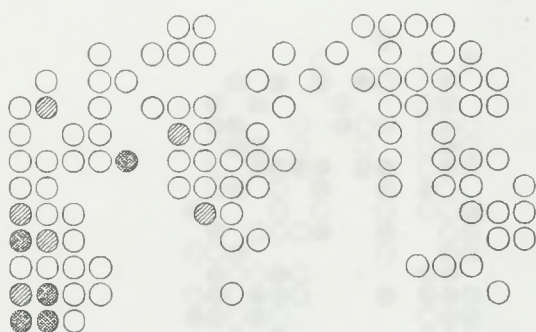
semaine 20



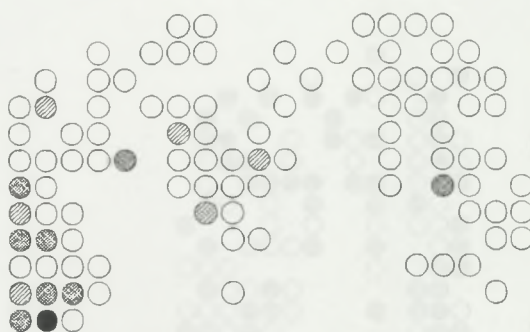
semaine 25



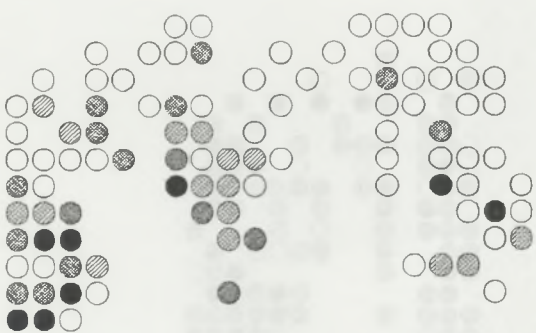
semaine 30



semaine 35



semaine 40



semaine 45



□ [0] ▨ [1 , 9[▩ [9 , 26[■ [26 , 100]



Figure 3.11 : Répartition de l'incidence de la maladie (en %) par arbre à Goura en 1999

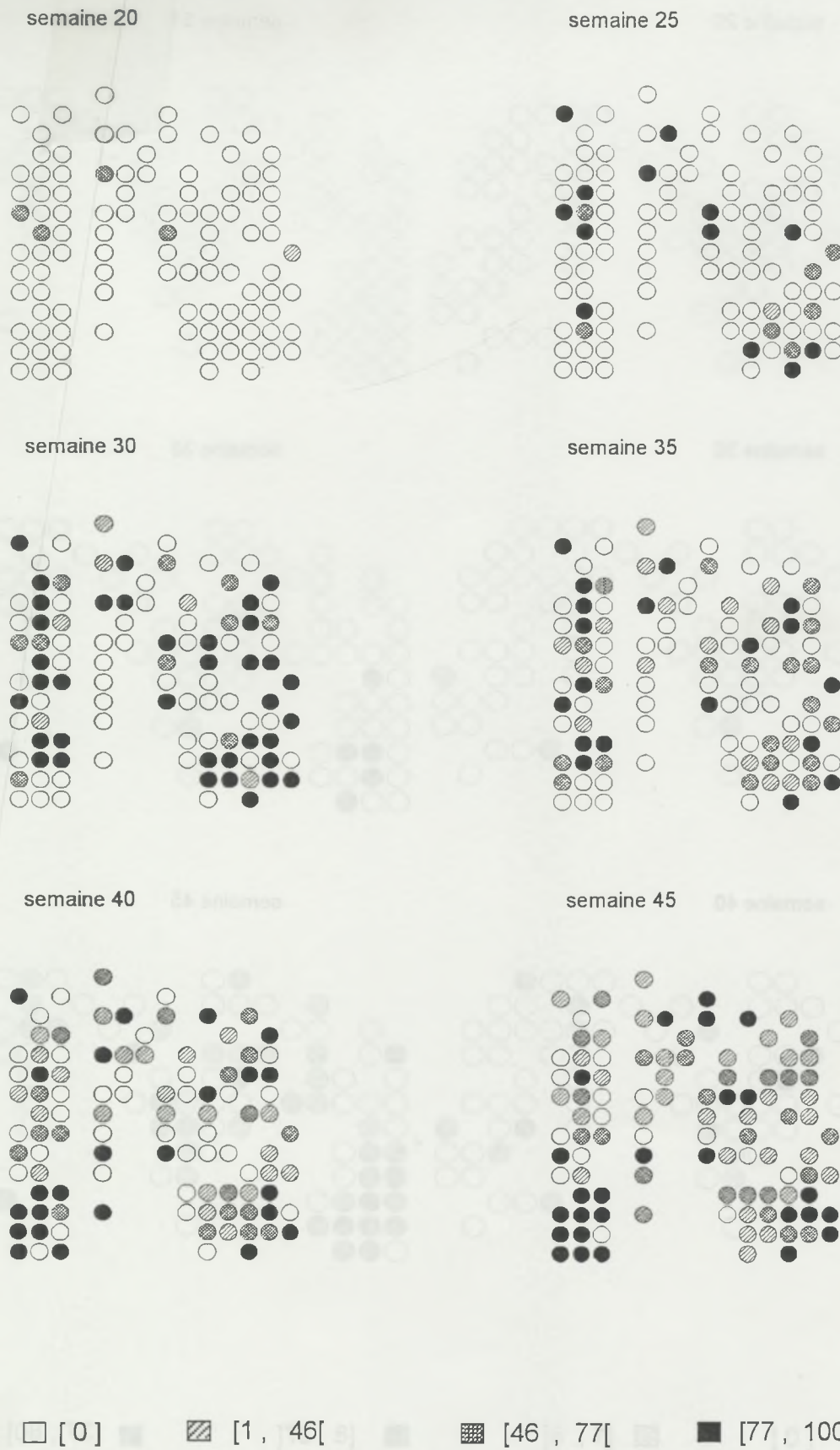


Figure 3.13 : Répartition de l'incidence de la maladie (en %) par arbre à Mbankomo en 2000

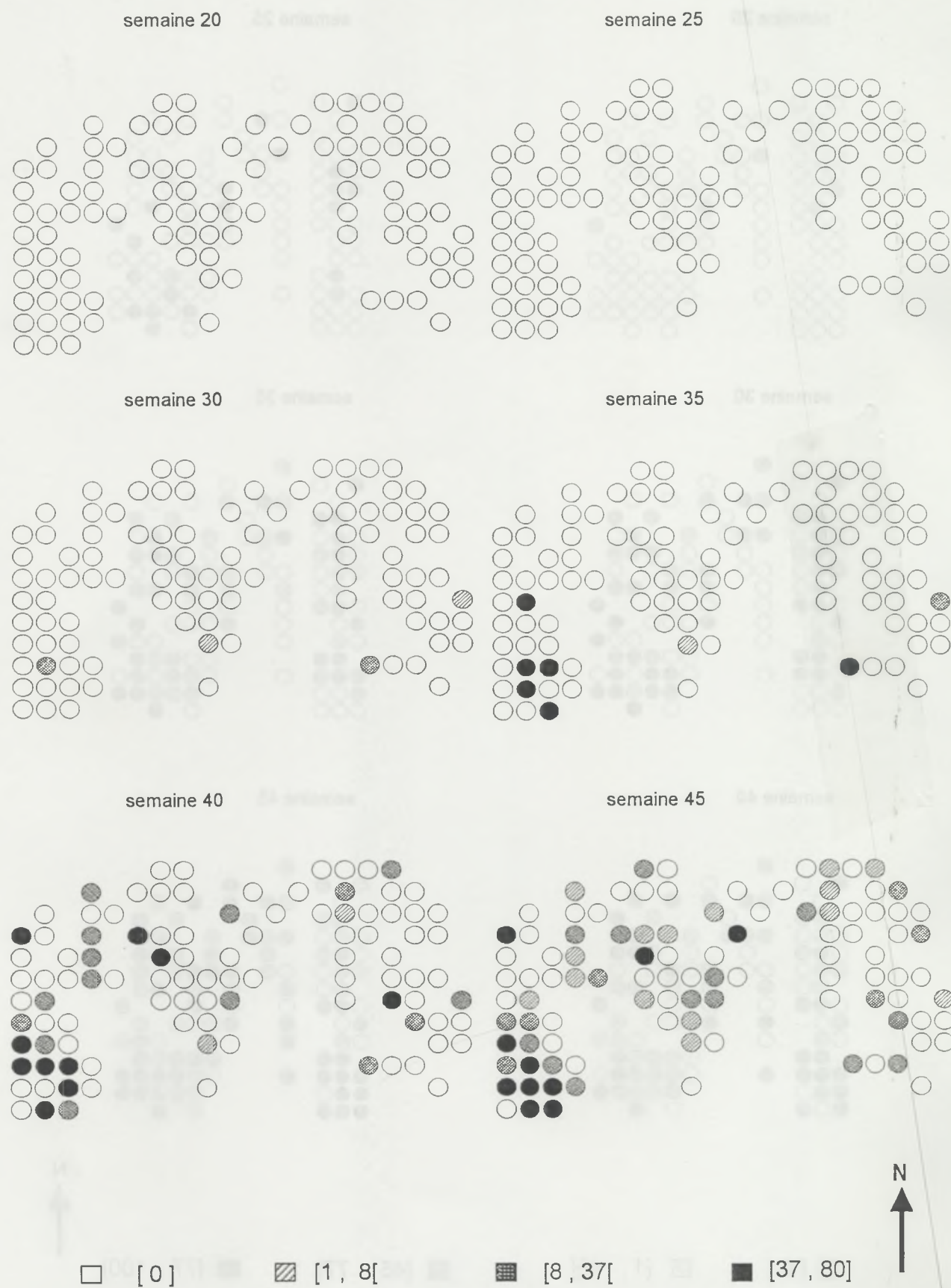
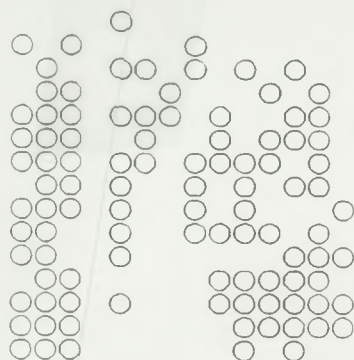
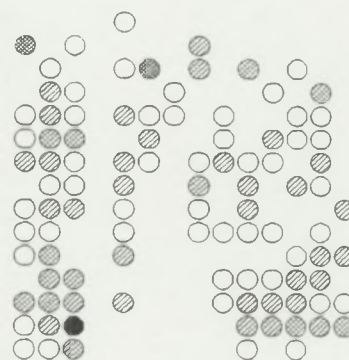


Figure 3.14 : Répartition de l'incidence de la maladie (en %) par arbre à Goura en 2000

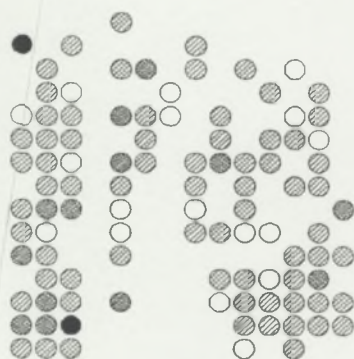
semaine 20



semaine 25



semaine 30



semaine 35



semaine 40



semaine 45



□ [0]

▨ [1 , 59[

▩ [59 , 76[

■ [76 , 100]

Figure 3.16 : Répartition de l'incidence de la maladie (en %) par arbre à Mbankomo en 2001

ANNEXE 4

Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à Mbankomo et Goura

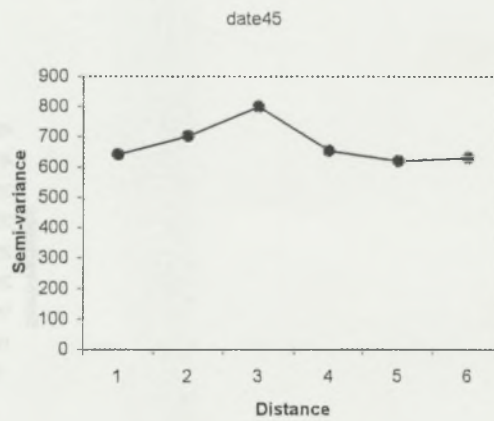
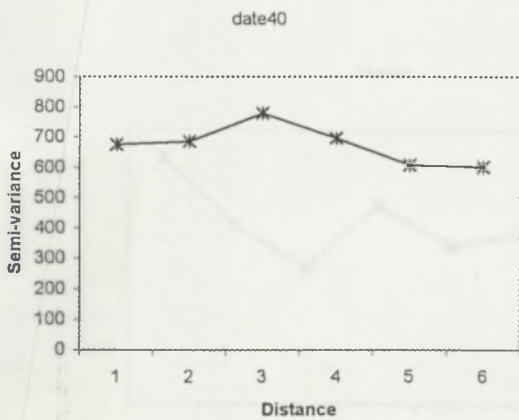
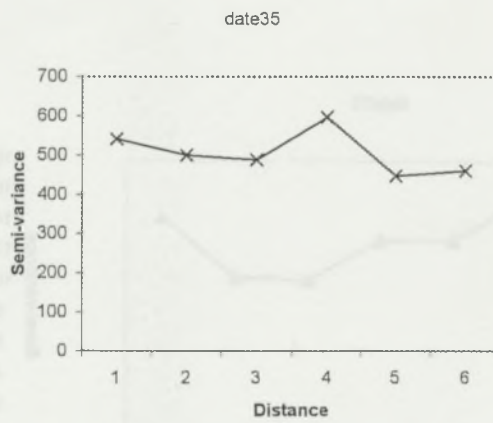
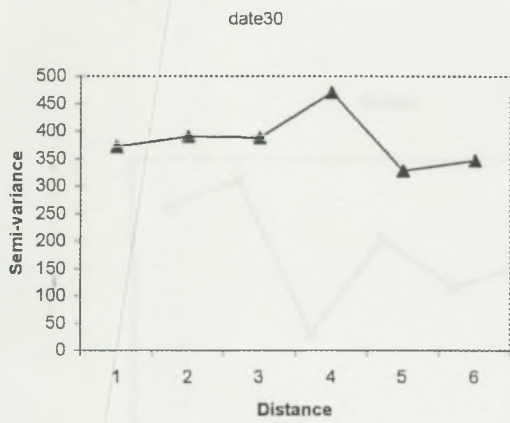
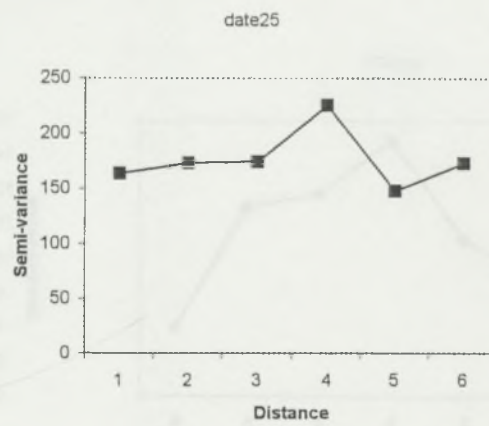
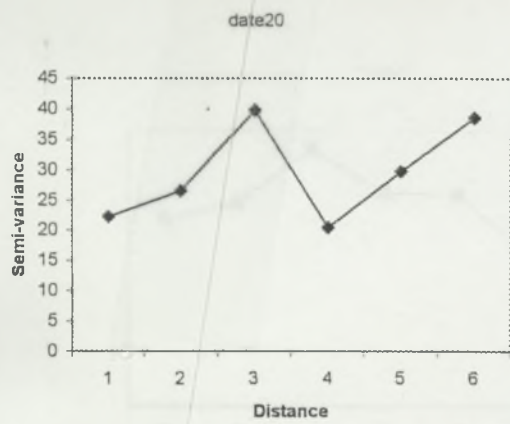


Figure 3.18 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année 1999 à Mbankomo

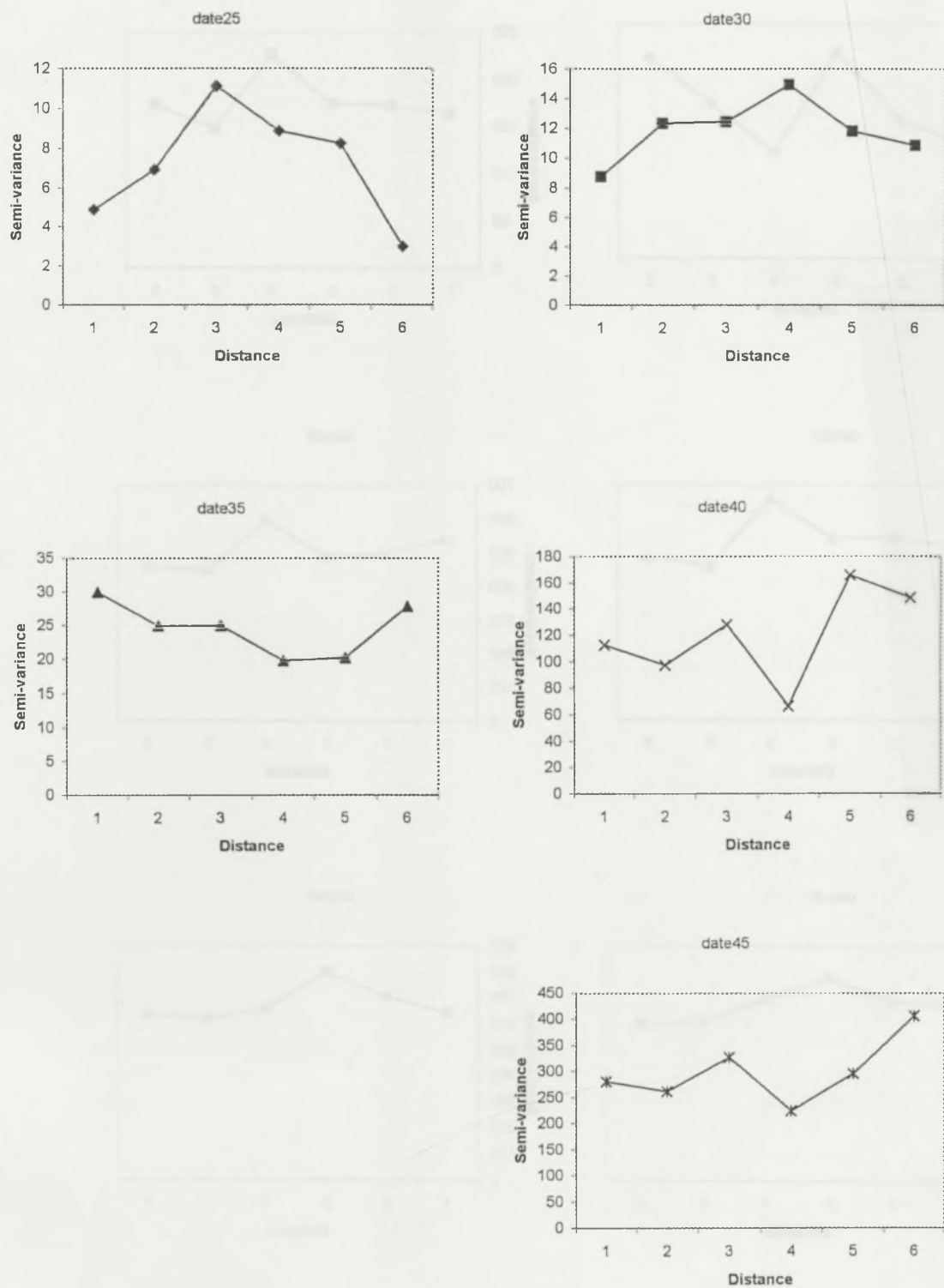


Figure 3.19 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année 1999 à Goura

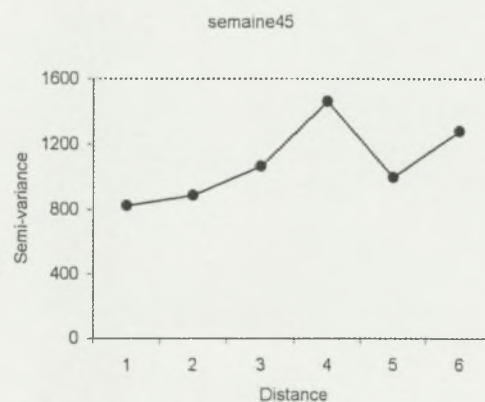
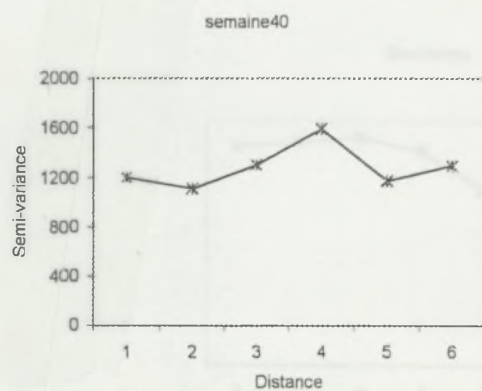
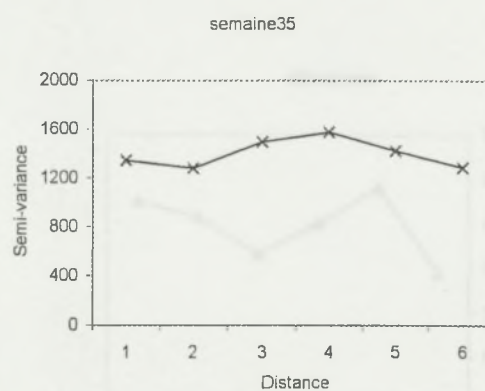
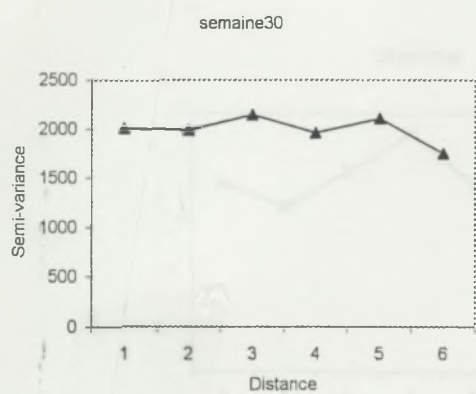
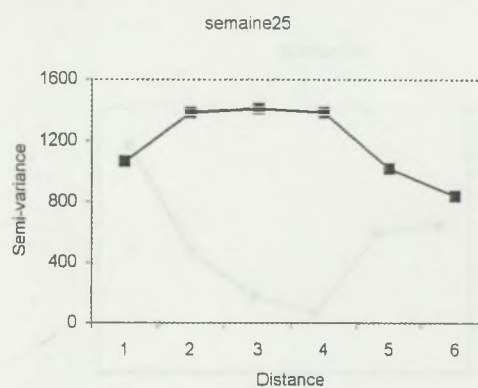
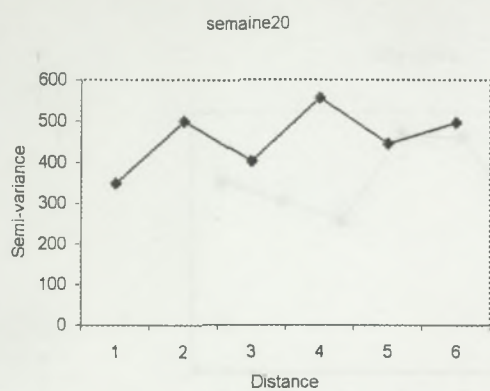


Figure 3.21 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année 2000 à Mbankomo

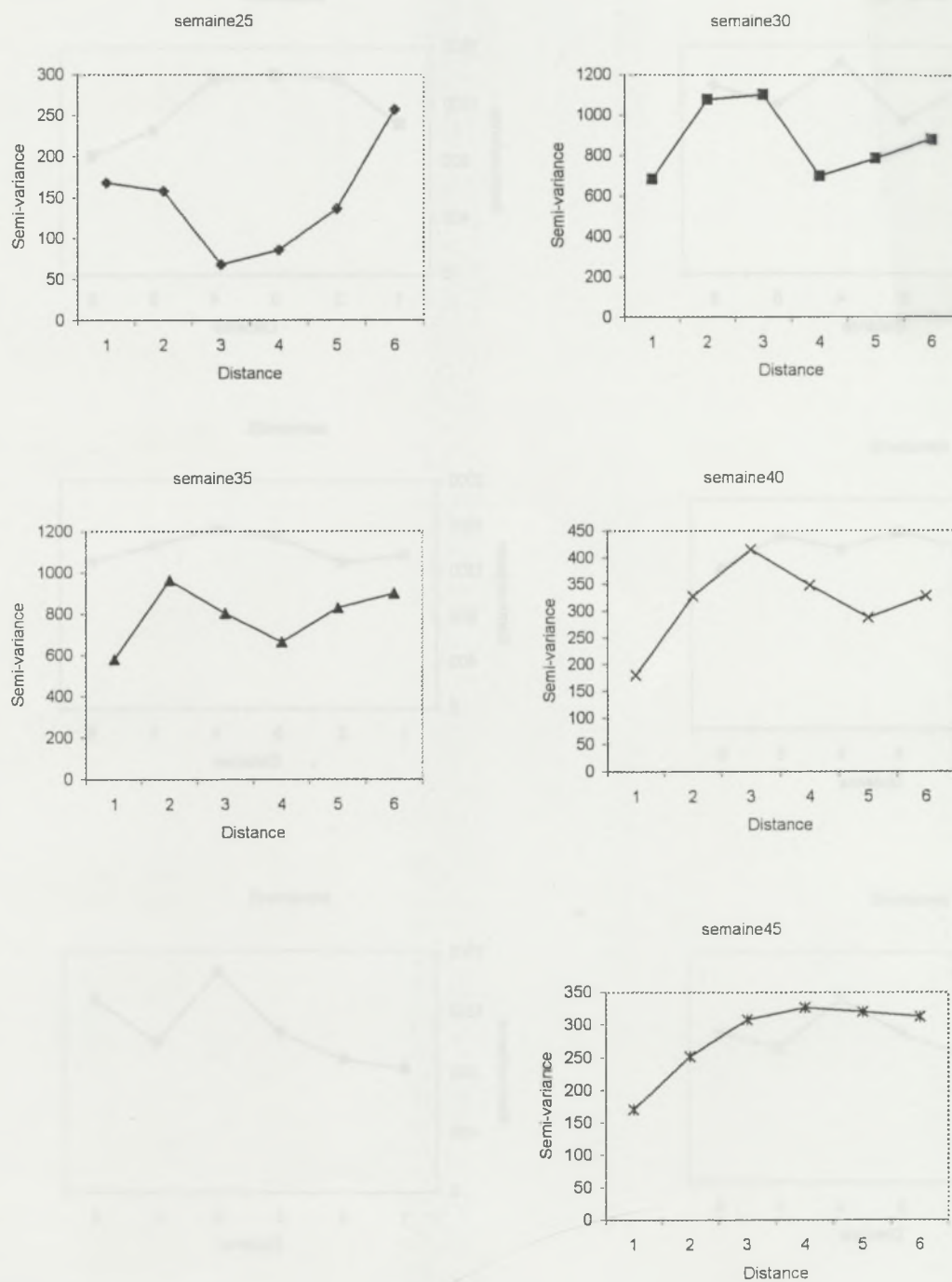


Figure 3.22 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année 2000 à Goura

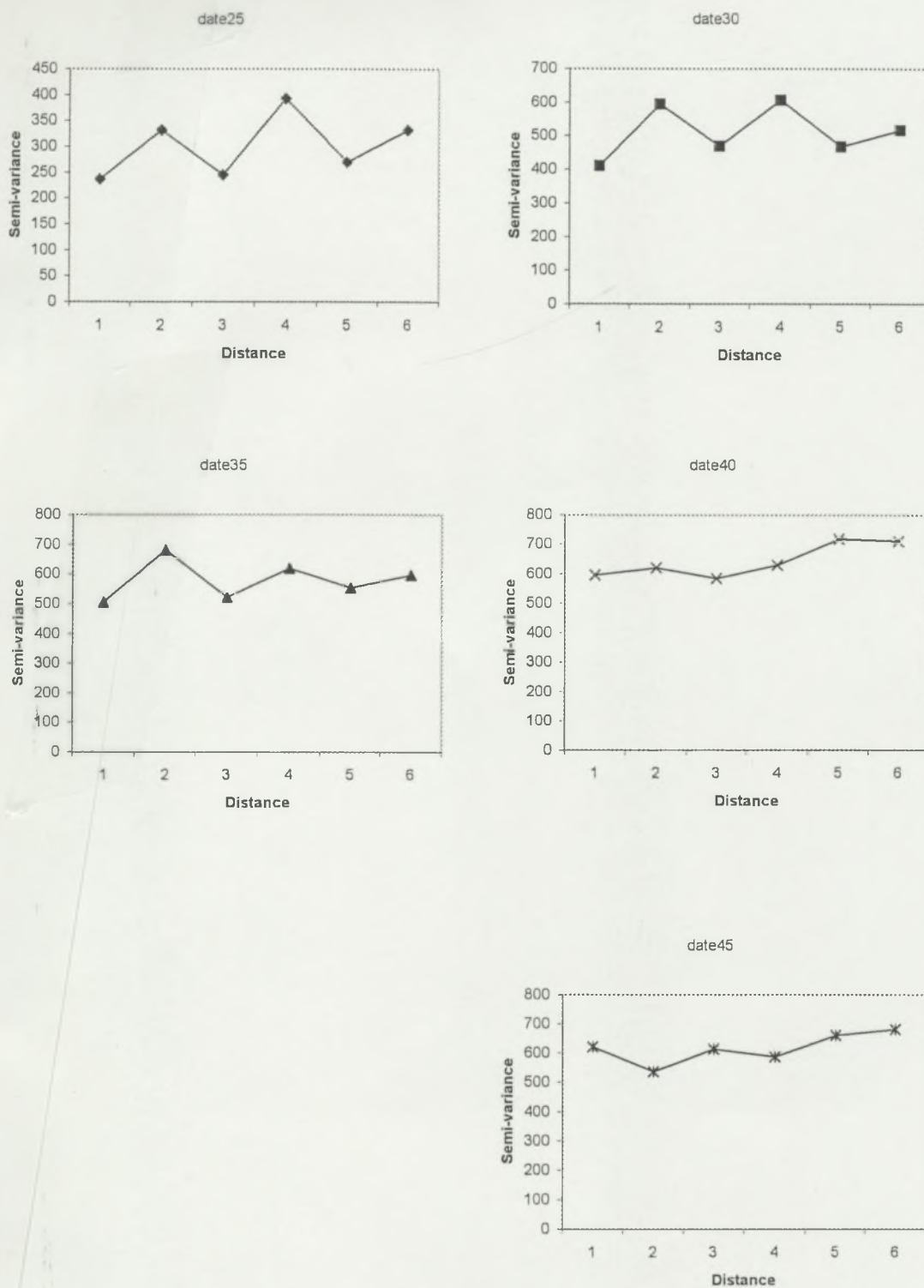


Figure 3.24 : Semi-variogrammes de l'incidence de la maladie à différentes dates de l'année 2001 à Mbankomo

ABSTRACT

Title : Incidence of agro-ecological factors on cocoa black pod disease in Cameroon: contribution to the implementation of a disease warnings system

Black pod disease, caused by *Phytophthora megakarya*, is the main cause of cocoa harvest losses in Cameroon. Present in almost all cocoa production areas and mainly controlled by chemicals, the disease is a major constraint with regard to economical, social and environmental aspects. To diminish this constraint, it is necessary to move from systematic to integrated protection, which basic principle is a better control, that is to plan interventions according to actual risks. The aim of this study was to optimize interventions in the various cocoa production zones in Cameroon. It is a contribution to the elaboration of a disease warnings system, in order to better advise cocoa farmers as far as potential epidemic risk is concerned.

Cross correlation and multiple regression analyses have allowed to establish relationships between the disease incidence and the climatic variables, notably the rainfall. Spatio-temporal analysis allowed to demonstrate in some fields the aggregation of trees bearing diseased pods, indicating the existence of disease foci. Field experiments were carried out in order to assess the impact of weekly phytosanitary pod removal on disease progress, potential production and final harvest. The generalized linear mixed model proved to be the most appropriate for comparing the two treatments (without and with pod removal). This trial allowed a better evaluation of the respective roles of primary and secondary inoculum in the spread of the disease.

The present study is therefore an important step towards a better understanding of components of the pathosystem, such as dispersal mechanisms, quantitative relations between the disease incidence and the climatic variables and the spatio-temporal dynamics of the epidemics.

The epidemiological and practical implications of the results are discussed.

Keywords : Spatio-temporal dynamics ; epidemiology ; integrated protection ; *Phytophthora megakarya* ; black pod disease ; *Theobroma cacao*.

RESUME

Au Cameroun, la pourriture brune des cabosses du cacaoyer, due essentiellement à *Phytophthora megakarya*, est responsable d'importantes chutes de production. Omniprésente dans l'ensemble des bassins de production de cacao et combattue surtout à l'aide de nombreux traitements fongicides, cette maladie est une contrainte phytosanitaire majeure dans le pays tant sur le plan économique que social et environnemental. Pour atténuer cette contrainte, il est nécessaire de passer d'une lutte chimique d'assurance à une lutte raisonnée, dont le principe de base est de mieux traiter, c'est-à-dire adapter les interventions aux risques réels. C'est avec le souci d'optimiser les interventions dans les différentes zones de production du cacao que la présente étude a été menée. A terme, il s'agira en fait de contribuer à l'élaboration d'un modèle d'avertissements agricoles, afin de pouvoir au mieux donner des conseils aux cacaoculteurs par rapport au risque épidémique potentiel.

Des analyses de corrélations croisées et de régression multiple ont permis d'établir des relations entre l'incidence de la pourriture brune des cabosses et les variables climatiques, notamment la pluviométrie. Des analyses spatio-temporelles ont permis de mettre évidence dans certaines parcelles, l'agrégation des arbres portant des fruits malades, indiquant ainsi l'existence des foyers d'infestation. Un essai sur le prélèvement hebdomadaire des fruits malades a été effectué. Une méthode d'analyse statistique innovante basée sur le modèle linéaire généralisé mixte a permis de comparer les traitements pour chacune des variables mesurées dans les parcelles « avec » et « sans » prélèvement des fruits atteints de pourriture brune. L'impact de cette pratique par rapport aux parcelles où aucune mesure prophylactique n'a été effectuée a pu être déterminé, évaluant ainsi la part d'inoculum secondaire due aux fruits malades.

La présente étude constitue donc une avancée importante vers une meilleure compréhension de l'épidémiologie de la maladie dans les domaines de mécanismes de dispersion, de relations quantitatives entre la maladie et les variables climatiques ainsi que de la progression spatio-temporelle de l'épidémie.

Les conséquences épidémiologiques et pratiques sont discutées.

Mots clés : Développement spatio-temporel ; épidémiologie ; lutte raisonnée ; *Phytophthora megakarya* ; pourriture brune ; *Theobroma cacao*.